©SCIEPRO/SHUTTERSTOCK
ABD RABBO/SIPA - ROB STEVENS -ART AND ROAM/SHUTTERSTOCK

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Anne L'Huillier, prix Nobel de physique

PRIX NOBEL
Les Français à l'honneur
Lasers, révolution ARN p.10

Aliments et santé p.54

FORME

Les 3 régimes à privilégier

PRÉVENTION

Contre les maladies
- cardio-vasculaires
- neurodégénératives
- intestinales...

et les cancers

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 921 - NOVEMBRE - ALIMENTS ET SANTÉ

L 13418 - 921 - F: 5,30 € - RD

NOVEMBRE 2023 - N° 921 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5.70 € / LUXEMBOURG 5.70 € / GRÈCE 5.70 € / BELGIQUE 5.70 € / ESPAGNE 5.70 € / PORTUGAL 5.70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

Embarquez pour une croisière unique sur les côtes des îles fascinantes du **Japon**. Vous explorerez les sites incontournables de cet archipel aux mille légendes, en compagnie de conférenciers tels que **Philippe Legrand**, **Barthélémy Courmont**...

*Prix incluant une remise de 500€/pers. pour toute réservation avant le 30 nov. 2023.

Carte du départ du 19 avril 2024. Photos : ©Sean Pavone / Shutterstock ©CelebrityCruises

Entre Tradition et Modernité : Naviguez à travers le Cœur du Japon

par Voyages d'exception

PLUSIEURS DÉPARTS :

MARS • AVRIL • OCT. 2024

Dès **6 490 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code JAPSA à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

VOYAGES-EXCEPTION.FR

Les visites du facteur, ça aide à bien vieillir chez soi.

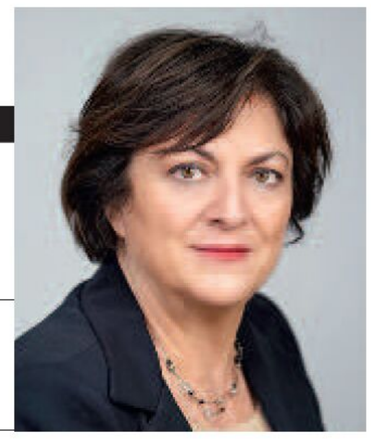
Les facteurs peuvent aussi livrer des médicaments, des repas, des courses et rendre visite aux plus fragiles pour favoriser leur maintien à domicile.

La Poste. Ça crée des liens entre nous.

La Poste – SA au capital de 5 857 785 892 € – 356 000 000 RCS Paris – Siège social : 9, rue du Colonel Pierre Avia 75015 Paris

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Iceberg temporel

Le temps a beau être difficile à définir, comme l'a montré le dernier numéro de *Sciences et Avenir–La Recherche* titré « L'origine du temps, la dernière théorie de Stephen Hawking », il prend une saveur particulière quand on évoque l'innovation. Car la fluidité des relations entre sciences et société ne va pas de soi. Un constat renouvelé lors d'une table ronde fin septembre, intitulée « La recherche fondamentale et son apport à la société », à laquelle notre magazine a eu la chance de contribuer.

Temps long au labo. Avec cet échange prenant place lors d'une semaine-atelier organisée par la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) du CNRS, on a pu mesurer à quel point le temps de la science s'accommode mal de l'ère actuelle de l'immédiateté. Si les idées jaillissent, les travaux qu'elle impulse nécessitent un temps long au laboratoire ou sur le terrain. Car il faut apporter la preuve de leur pertinence avant même qu'elles ne conduisent à une découverte d'importance. Quant à savoir si (et quand) cette dernière se muera en innovation utile à la société…

La persévérance récompensée. À tout seigneur, tout honneur, les prix Nobel 2023, célébrés aujourd'hui dans nos colonnes *(lire p. 10)* en donnent des exemples rétrospectifs flagrants. Si l'ARN messager a pu accéder au rang de vedette anti-Covid 19, avec des vaccins innovants élaborés en moins d'un an, c'est bien parce qu'une recherche approfondie dans le domaine avait été conduite depuis plus de trente ans. La partie émergée d'un iceberg temporel. Et ce, grâce à la persévérance de la biochimiste hungaro-américaine Katalin Karikó.

Patience pour le Nobel. Quant aux boîtes quantiques, qui semblent aujourd'hui régner un peu partout, des LED aux panneaux solaires, en passant par l'imagerie médicale, voilà plus de quatre décennies qu'a eu lieu la découverte optique à leur origine. On notera aussi, ce qui est plus banal, que les huit nobélisé(e)s de 2023 ont dépassé la soixantaine, dont deux ayant 80 ans et plus. Patience, patience.

Six décennies. On pourrait multiplier les exemples qui montrent les tempos différents de la découverte — et son approfondissement —, de l'invention et de l'innovation. Pour la découverte de l'ARN messager, il faudrait remonter à plus de six décennies, lorsqu'en 1961 François Jacob (Nobel 1965) et François Gros, tous deux de l'Institut Pasteur, ont identifié et donné son nom à cet acide ribonucléique jouant les intermédiaires dans les mécanismes génétiques.

Laser et CO_2. On pourrait citer l'adoption industrielle du laser plus de quinze ans après son invention en 1960, la théorie étant issue de la mécanique quantique, des décennies auparavant… Et on ne remonte même pas au chimiste Svante Arrhenius (Nobel 1903) qui, à la fin du XIX^{e} siècle, énonçait que l'accroissement de CO_2 dans l'atmosphère conduirait à son réchauffement. Un pronostic scientifique fondamental encore nié, malgré tous les rapports du Giec, par les climatosceptiques, plus d'un siècle après. ■

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Alzheimer - Parkinson : le retour des thérapies innovantes »

(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 919, septembre 2023)

Quelle est l'incidence de l'apnée du sommeil sur les maladies neurodégénératives ?

Violette Simsolo

S. et A. : On sait que les troubles du sommeil, dont l'apnée, sont en lien avec le risque de déclin cognitif. Une étude récente établit une corrélation entre les apnées et la présence de plaques amyloïdes dans le cerveau, l'un des signes de la maladie d'Alzheimer. De plus, on sait que le système lymphatique, chargé de l'élimination de différentes substances toxiques et déchets accumulés dans le sang, s'active pendant le sommeil. En cas de déficit de sommeil, ce système dysfonctionne.

À propos des articles au sujet de la maladie d'Alzheimer, il me manque depuis longtemps une explication : quel est le rôle normal des protéines amyloïdes ?

Carlo Wyss

S. et A. : La bêta-amyloïde est une protéine produite naturellement par le cerveau. Elle provient de l'APP (amyloid precursor protein), une fois découpée par des enzymes. L'APP tout comme la bêta-amyloïde qui en est issue sont des composants normaux de l'organisme. L'APP aide par exemple les neurones à croître, à survivre et à se réparer quand ils subissent des lésions.
On retrouve la protéine bêta-amyloïde dans les neurones, mais aussi dans la circulation sanguine. La bêta-amyloïde possède une longueur variable, de 38 à 42 acides aminés. L'hypothèse de la cascade amyloïde suggère qu'un dysfonctionnement entraînerait la production accrue d'un peptide de forme longue, à 42 acides aminés, qui s'agglutinerait plus facilement en plaques que les autres.

Virus et immunité

Dans votre article « Virus, pourquoi ils détraquent l'immunité » (*S. et A.* n° 919), il est expliqué que l'infection est l'élément déclenchant du processus auto-immun ; mais que celui-ci se produira dans une faible proportion. On prépare des vaccins dont on ne connaît pas l'efficacité. Pense-t-on à une campagne de vaccination de toute la population ?

Hugo Pérez Bercoff

S. et A. : Certains rêvent peut-être déjà de campagnes de vaccination à large échelle pouvant éradiquer la sclérose en plaques, mais en l'état actuel des connaissances, il y a peu de chances que leur pertinence sanitaire soit confirmée. Dans cette perspective, il faudrait des vaccins dits neutralisants, empêchant durablement toute infection, comme le fait par exemple celui de la rougeole. Nous n'y sommes pas.
Par ailleurs, la très faible proportion de personnes déclenchant effectivement une maladie auto-immune à la suite des infections citées ne pourrait justifier à elle seule une campagne de vaccination. À moins, peut-être, de découvrir que ces infections ont bien d'autres conséquences encore inconnues. Toutefois, si un vaccin très efficace venait à être développé, la question serait posée aux experts en santé publique.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

La science de l'assiette

La nutrition ne serait pas un véritable sujet de science ? Le Collège de France — excusez du peu — nous prouve le contraire en consacrant cette année sa chaire de santé publique à la « prévention nutritionnelle des maladies chroniques » ! Objectif : *« Démêler le vrai du faux entre réelles connaissances scientifiques et "fake news", dans un domaine qui fait couler beaucoup d'encre et qui fait l'objet d'importants intérêts économiques »*. Même si elle est sans doute attribuée à tort à Hippocrate, l'injonction *« Que ton alimentation soit ta meilleure médecine »* témoigne du fait que le lien entre ce que l'on ingère et la santé est établi depuis les débuts de la médecine occidentale. Voilà plus de 2000 ans que les connaissances scientifiques s'accumulent. Et, plus récemment, les résultats d'études épidémiologiques de grande ampleur viennent compléter des expériences en laboratoire. Aujourd'hui, les médecins recommandent principalement trois grands régimes que nous vous détaillons dans ce numéro. Les adopter, même tardivement, est un moyen puissant de se prémunir des pathologies intestinales, cardiaques ou digestives. Une saine alimentation est tout aussi essentielle pour prévenir les cancers que pour accompagner leur traitement. Jusqu'à un âge avancé, en luttant contre la dénutrition, soigner son assiette permet de vivre mieux, plus longtemps. L'héritage culturel de la cuisine mérite d'être réajusté à la lumière des dernières publications scientifiques. Autre domaine où il faut sans cesse réajuster ses connaissances : l'intelligence artificielle. La soudaine mise à disposition de tous des grands modèles de langage à la suite de chatGPT est une révolution dont on peine encore à percevoir la portée. De même dans le domaine du son et de l'image. Chaque mois apporte son lot de nouveautés qu'il faut décrypter. Aussi nous vous proposons un nouveau rendez-vous : le journal de l'IA, deux pages pour décoder une problématique et le vocabulaire qui l'accompagne *(p. 40)*. Bonne lecture et bon appétit ! ■

> « Aujourd'hui, les médecins recommandent principalement trois grands régimes que nous vous détaillons »

À nos abonnés : Dans un souci d'écoresponsabilité, votre journal, toujours imprimé en France avec du papier certifié issu de forêts gérées durablement, vous parvient désormais dans un emballage en papier à la place du plastique. Si, malgré le plus grand soin que nous apportons à son expédition, vous constatiez un problème à la réception, n'hésitez pas à le signaler au service abonnement.

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD,
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. CARLIEZ, S. CARON, C. COUMAU, P. KALDY, M. PARRA, M. DA PONTE
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », les messages « La Croix », « Courrier International » et « First Voyages » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés , ainsi qu'un message « L'Homme Moderne » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A1123

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 921 / Novembre 2023

DOSSIER P. 54

Ces aliments qui nous protègent

Okinawa, Mind ou méditerranéen : chacun de ces régimes compose un menu type associant les aliments les plus bénéfiques pour l'organisme. Pour prendre soin de son cœur, de son cerveau ou de ses intestins, voici les conseils des meilleurs nutritionnistes.

P. 30

Première plongée dans le manteau de la Terre

Une expédition a recueilli des tonnes d'échantillons du manteau à plus de 1000 m sous le plancher océanique. Un matériau inédit pour comprendre les entrailles de la Terre.

P. 42

Incendies : le difficile bilan climatique

La recrudescence des feux cet été a été notamment causée par la hausse des températures, liée au changement climatique. Un phénomène dont l'ampleur reste difficile à évaluer.

P. 78

Les derniers mystères du Mont-Saint-Michel

Les recherches en cours sur le site ont permis de nouvelles découvertes sur son histoire. Mais de nombreuses questions demeurent, notamment sur son origine.

5 **Éditorial** par Dominique Leglu

6 **Courrier**

7 **Édito** par Mathieu Nowak

PRIX NOBEL

10 **Les lauréats 2023**

SCIENCES FONDAMENTALES

14 **ACTUALITÉS** Une moisson exceptionnelle d'échantillons d'astéroïde / Le laser à rayons X qui bat tous les records

30 **Terre : première plongée dans le manteau**

36 **Un nouveau supercontinent dans l'Univers**

40 **Le journal de l'IA : pourquoi ChatGPT est meilleur en anglais**

NATURE

18 **ACTUALITÉS** Les plantes ont des relations sociales / Cette méduse apprend sans cerveau

42 **Incendies : le difficile bilan climatique**

48 **Quand la fausse morille détruit le cerveau**

SANTÉ

22 **ACTUALITÉS** Des cellules cérébrales d'un nouveau type / Une neuroprothèse pour les bras des tétraplégiques

68 **Tics : mieux les comprendre pour mieux les soigner**

74 **L'héritage du Human Brain Project**

HISTOIRE

26 **ACTUALITÉS** La plus ancienne construction en bois / Un mystérieux « bol d'arc-en-ciel »

78 **Les derniers mystères du Mont-Saint-Michel**

83 **Ces dinosaures qui venaient du froid**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de novembre**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE - LESLEY ANDERSON, US ANTARCTIC PROGRAM & IODP JRSO - CHINE NOUVELLE/SIPA - STEPHANE COMPOINT / ONLYFRANCE.FR

PHYSIQUE

Anne L'Huillier, pionnière de la physique ultrarapide

La chercheuse franco-suédoise a été récompensée avec le Français Pierre Agostini et l'Austro-Hongrois Ferenc Krausz pour avoir posé les bases de la « physique attoseconde » en développant des lasers à impulsions ultrabrèves.

« *Ce que je trouve le plus passionnant, c'est l'exploration des propriétés quantiques de la matière, comme l'intrication. […] Nous développons des techniques pour mesurer ces états quantiques.* » Ainsi s'exprimait Anne L'Huillier dans *Sciences et Avenir–La Recherche* en février dernier dans le cadre d'un article sur la physique attoseconde (« Physique ultrarapide : elle fige le temps », *S. et A.* n° 912). Et quand on lui demandait comment elle envisageait l'avenir de sa discipline dans le quantique, elle poursuivait : « *C'est tout nouveau. Je ne sais pas où ça va. Mais nos mesures sont de plus en plus raffinées, complexes. Nous pouvons espérer que le rêve devienne réalité.* » Ainsi se manifestait intact « *l'esprit pionnier* » qui vaut aujourd'hui à Anne L'Huillier la récompense suprême décernée par le jury de Stockholm. À l'origine des lasers à impulsions ultrabrèves, d'abord femtosecondes (10^{-15} s), puis attosecondes (10^{-18} s), elle partage le prix Nobel de physique avec Pierre Agostini et Ferenc Krausz pour ses travaux dans une discipline à laquelle personne ne croyait vraiment lorsqu'elle s'est esquissée à la fin des années 1980.

À la poursuite des lasers ultrabrefs jusqu'en… Suède

La future lauréate a étudié à l'École normale supérieure de Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), avant d'obtenir en 1986 un doctorat d'État en sciences physiques à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Elle entre au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), à Saclay, pour faire sa thèse en 1981. Elle y est recrutée en 1986. En 1987, elle fait partie de l'équipe qui découvre qu'en arrachant des électrons aux atomes avec un intense faisceau laser, on provoque l'émission d'un spectre lumineux comportant de nombreux harmoniques à très haute fréquence, émis sous la forme de flashs de lumière ultrabrefs. Dans un portrait que lui consacrait *La Recherche* en 2011, Anne L'Huillier évoquait ainsi ces premiers travaux. « *Nous étions cinq chercheurs à travailler sur cette expérience. Pourquoi donc [ai-je] été considérée comme la pionnière ? Sans doute parce qu'à la suite de ces observations, j'ai décidé d'aller voir plus loin, pour comprendre le phénomène inattendu qu'on avait observé.* »
À l'époque, on ignore en effet le mécanisme qui ne sera détaillé pour la première fois qu'en 1993 par le physicien canadien Paul Corkum, complété l'an-

VERONIQUE DURRUTY/GAMMA-RAPHO

La professeure de physique atomique et chercheuse Anne L'Huillier, à l'université de Lund, en Suède, en 2012.

née suivante par Anne L'Huillier, entre autres. En bombardant un gaz avec un laser intense, les électrons sont presque arrachés à l'atome. Mais la trajectoire de certains revient vers lui. Les électrons relarguent alors leur énergie sous la forme d'impulsions très courtes et très énergétiques. Le domaine fera aussi un grand pas lorsque les durées de ces fameuses impulsions ultrabrèves seront mesurées avec précision pour la première fois, et séparément, en 2001 par Pierre Agostini au CEA, et Ferenc Krausz à l'université de Vienne (Autriche).

Les lauréats
(de gauche à droite)
Anne L'Huillier, 65 ans, université de Lund (Suède).
Pierre Agostini, 82 ans, université de l'Ohio (États-Unis).
Ferenc Krausz, 61 ans, Institut Max-Planck de Munich (Allemagne).

En 1995, Anne L'Huillier s'installe à l'université de Lund, une petite ville à l'extrême sud de la Suède. *« J'y étais allée trois ans plus tôt, parce que l'université avait acheté le premier laser commercial à impulsions femtosecondes »*, expliquait-elle en 2011. Le CEA tente de la retenir, en lui proposant notamment un nouveau laser. *« Ça m'a arraché le cœur de partir. J'avais l'impression de commettre une grosse erreur sur le plan de ma carrière scientifique. Pas facile de débarquer comme cela dans un pays dont je ne parlais pas la langue. Mais finalement, j'ai pu poursuivre mes recherches comme je l'entendais. »*

Loin d'avoir hypothéqué sa carrière, Anne L'Huillier réalise un sans-faute, jalonné de récompenses, dont le prix L'Oréal-Unesco Pour les femmes et la science en 2011, et le prestigieux prix Wolff en 2022. La pionnière a été depuis rejointe par une belle cohorte, comme le souligne Franck Lépine, directeur de recherche CNRS à l'institut Lumière Matière de Lyon : *« La physique ultrarapide occupe aujourd'hui plus de 900 scientifiques en France, répartis sur plus de 50 laboratoires. Elle attire aussi beaucoup de doctorants, une des preuves de la vitalité de cette communauté. Il faut enfin ajouter une dizaine d'industriels qui travaillent à l'élaboration des sources lasers. »* La France compte quatre installations attosecondes, Celia (Bordeaux), ILM (Lyon), LOA (Palaiseau) et AttoLab (Saclay).

Voir la matière se mettre en mouvement

L'essor de la discipline s'explique notamment par les applications qu'elle offre. Éclairer ainsi la matière revient à disposer en quelque sorte d'une caméra capable de prises de vues de 10^{-15} s à 10^{-18} s, ce qui permet de voir la matière se mettre en mouvement, comme le résumait en février dernier Éric Collet, de l'Institut de physique de Rennes : *« À*

AFP - SIPA

l'échelle femtoseconde, vous décomposez les mouvements des atomes ou des molécules. La résolution attoseconde donne accès aux mouvements des électrons durant les réactions chimiques. C'est le stade ultime de la dynamique de la matière. »

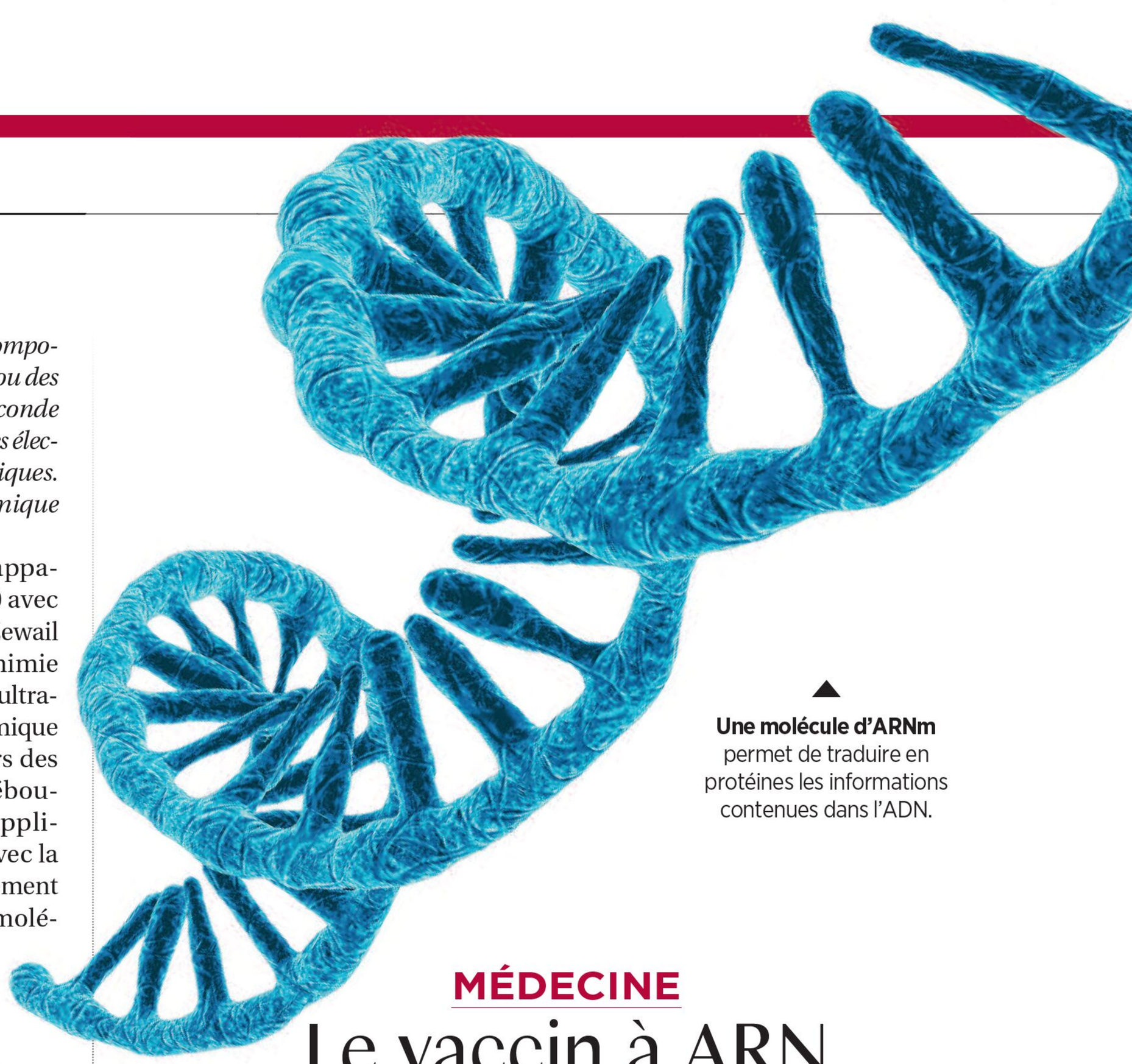
Les premières applications apparaissent dans les années 1990 avec le chimiste égyptien Ahmed Zewail (1946-2016), prix Nobel de chimie 1999. Il utilise les impulsions ultrabrèves afin d'observer la dynamique des liaisons entre atomes lors des réactions chimiques. Cela débouchera sur de nombreuses applications en pharmacologie, avec la possibilité d'améliorer le rendement de réactions de synthèse de molécules médicamenteuses.

Explorer les propriétés quantiques de la matière

À la différence de son homologue des plateaux de cinéma, une caméra ultrarapide peut aussi manipuler ce qu'elle observe. L'éclairage laser, qui se produit dans une large gamme de longueurs d'onde (infrarouge, visible, ultraviolet, X), permet en effet de contrôler les propriétés des matériaux, de transformer un isolant en conducteur par exemple, ou bien rendre magnétique un matériau uniquement en l'éclairant.

Mais le « rêve » évoqué par Anne L'Huillier au début de cet article consiste désormais à explorer les propriétés quantiques de la matière, grâce aux sources attosecondes parvenues à maturité. Déjà en mars 2022, le laboratoire AttoLab était parvenu à filmer en temps réel un électron arraché à son atome sous l'effet de la lumière. L'effet photoélectrique, décrit par Albert Einstein en 1905, s'affichait ainsi en 3D sur l'écran des chercheurs… Le prélude à d'autres films tournés au cœur même de la matière, dans le monde étrange de la physique quantique. ■

Fabrice Nicot



Une molécule d'ARNm permet de traduire en protéines les informations contenues dans l'ADN.

SHUTTERSTOCK

MÉDECINE

Le vaccin à ARN messager en vedette

Grâce à cette technologie innovante, le développement très rapide d'un vaccin efficace contre le Covid-19 a été possible.

En octobre 2022, *Sciences et Avenir–La Recherche* plaçait l'ARN messager (ARNm) en première position dans son dossier « Les 7 traitements qui révolutionnent la médecine ». Nous annoncions alors un possible Nobel pour les jours suivants. Il aura fallu attendre encore un an. Un an pour que les perspectives se dessinent davantage pour une technologie encore trop associée au Covid-19. C'est que, sans cette terrible pandémie, l'ARN messager thérapeutique serait peut-être encore considéré comme une obsession maladive des deux récipiendaires du Nobel de médecine 2023, Katalin Karikó et Drew Weissman. Mais leur technologie était mûre au bon moment. Et permit l'impossible : mettre au point et produire en quelques mois un vaccin contre une maladie nouvelle, alors que le temps de développement se comptait jusqu'alors en années. Pour réaliser cet exploit, l'idée-force des deux chercheurs était de faire du corps humain sa propre usine à médicaments. L'ARNm est la molécule qui permet de traduire les informations contenues dans l'ADN en protéines. En injectant des ARNm synthétisés au laboratoire, on confie aux cellules le soin de produire les protéines que l'on souhaite. En l'espèce, il s'agissait de faire produire la protéine spike du Sras-Cov-2. Le corps humain la reconnaissant comme étrangère, mobilisait son système immunitaire, et celui-ci

Les lauréats
(de gauche à droite)
Katalin Karikó, 68 ans
Drew Weissman, 64 ans, université de Pennsylvanie (États-Unis).

SIPA

était alors prêt pour réagir rapidement le jour de la véritable infection. Efficace et peu coûteux.
Fondée en 2008, la start-up allemande BioNTech, qui développe des vaccins à ARNm, pèse aujourd'hui plus de 25 milliards de dollars. Katalin Karikó en fut vice-présidente jusqu'en 2022. Quelle revanche pour celle à qui l'on avait fermé toutes les portes !
L'intuition que l'ARNm pourrait être un puissant outil thérapeutique lui vient à la fin des années 1970, après sa thèse de doctorat soutenue en Hongrie. Faute de financements en Europe, elle part pour les États-Unis sans le sou, sans contacts, à l'université Temple puis à celle de Pennsylvanie, où, pendant plus de vingt ans, elle apprend à surmonter les difficultés techniques inhérentes à la manipulation d'une molécule terriblement fragile.

Une rencontre décisive à la photocopieuse

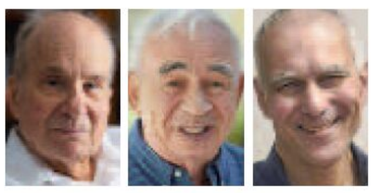
À la fin des années 1990, Katalin Karikó rencontre — *« à la photocopieuse »* — l'immunologiste Drew Weissman. Ensemble, ils modifient chimiquement les ARNm afin qu'ils ne soient pas rejetés par le système immunitaire. En remplaçant une molécule (l'uridine) par une autre (la pseudo-uridine), la réaction inflammatoire disparaît et la protéine voulue est fabriquée par la cellule. Le dernier obstacle est levé. En guise de félicitations, Katalin Karikó est priée de quitter son laboratoire. La suite de l'histoire se déroule dans la start-up allemande. Aujourd'hui, des essais cliniques sont en cours pour un vaccin contre le virus Nipah, le paludisme ou encore le cancer. *« Cela fait plaisir de voir son travail reconnu, mais ce n'est pas essentiel. Mon bonheur est de voir que la stratégie de l'ARNm a permis de sauver des vies »*, confiait-elle au magazine *La Recherche* dans un grand entretien publié en janvier dernier. ■ **M. N.**

CHIMIE

La révolution des « quantum dots »

Les trois chercheurs ont été primés pour « la découverte et la synthèse des boîtes quantiques ».

Au Moyen Âge, les maîtres verriers fabriquaient des vitraux en faisant fondre un mélange de sable et de cendres végétales. Puis ils ajoutaient de petites quantités de métaux comme du cobalt, du nickel ou du manganèse, qui absorbent certaines longueurs d'onde du spectre lumineux et produisent ainsi une palette de verres colorés. Le Nobel de chimie 2023 honore trois chercheurs qui ont largement contribué à renouveler la science des couleurs — engendrées cette fois par des phénomènes quantiques à une échelle un million de fois plus petite qu'une tête d'épingle. Alors qu'ils ont été primés pour *« la découverte et la synthèse des boîtes quantiques »*, les procédés et théories qu'ils ont élaborés sont utilisés aujourd'hui pour une variété d'applications industrielles : dans la fabrication des écrans de télévision QLED, les panneaux solaires et dans l'imagerie médicale.



Les lauréats
(de gauche à droite)
Louis Brus, 80 ans, Columbia University (États-Unis).
Alexei Ekimov, 78 ans, Nanocrystals Technology Inc., (États-Unis).
Moungi Bawendi, 62 ans, Massachusetts Institute of Technology (États-Unis).

SIPA

À quoi correspondent ces « boîtes quantiques » (*quantum dots*, en anglais) ? Il s'agit de cristaux de semi-conducteurs d'une taille infime, composés de quelques centaines d'atomes, soit un diamètre de quelques milliardièmes de mètre (nanomètres). Si petits que les effets quantiques qui se manifestent alors déterminent les propriétés physiques de ces cristaux. Les électrons qui s'y trouvent piégés modifient notamment les couleurs émises.

Mais ce qui est particulièrement intéressant est que ces couleurs dépendent directement de la taille des nanostructures, quel que soit l'élément chimique qui les compose. C'est comme si *« le tableau périodique gagnait soudainement une troisième dimension,* explique le comité Nobel. *Les propriétés d'un élément ne sont plus dictées uniquement par leurs couches électroniques et le nombre d'électrons présents en périphérie. Car au niveau quantique, la taille compte également. »*

Un contrôle très fin des nanocristaux

La découverte que les cristaux absorbent différemment la lumière selon leur taille a été faite indépendamment dans les années 1970-1980 des deux côtés du rideau de fer par Alexei Ekimov à l'Institut d'optique d'État Vavilov de Leningrad, dans l'ex-URSS, et par Louis Brus des Laboratoires Bell dans le New Jersey, aux États-Unis. Le troisième lauréat, Moungi Bawendi, a inventé au Massachusetts Institute of Technology, à Cambridge, aux États-Unis, un procédé qui révolutionna le domaine. En saturant une solution en séléniure de cadmium et en jouant sur la température, il parvint en 1993 à contrôler très finement la croissance des nanocristaux. Ceux-ci possèdent tous, désormais, les dimensions souhaitées. Et sont également de très bonne qualité, sans défaut. ■ **F. D.**

La capsule a été installée dans une salle blanche au centre spatial Johnson (Houston, États-Unis) pour éviter toute contamination de son contenu.

KEEGAN BARBER/NASA

Une moisson exceptionnelle d'échantillons d'astéroïde

Les morceaux de roches recueillis à la surface de Bénou par la mission américaine Osiris-Rex recèlent de grandes quantités d'eau et de carbone, selon les premières analyses.

C'est un succès total pour la mission américaine Osiris-Rex (Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer) qui, après avoir voyagé sept ans dans l'espace et collecté des morceaux de roche à la surface de l'astéroïde Bénou, a largué le 24 septembre son précieux chargement dans le désert de l'Utah (États-Unis). Empaqueté dans une capsule de 80 cm de diamètre, il a été transporté par l'US Air Force au centre spatial Johnson de la Nasa (Texas). Deux semaines plus tard, l'écrin a été ouvert à l'aide d'une boîte à gants remplie d'azote, installée elle-même dans une salle blanche évitant au possible les risques de contamination. Résultat : des milliers de grains et fines poussières de couleur noire contenant de grandes quantités d'eau et de carbone, selon les premières analyses révélées le 11 octobre. La masse totale de la collecte — estimée à 250 g avant l'ouverture de la capsule — restait indéterminée.

Un vestige de la formation des planètes

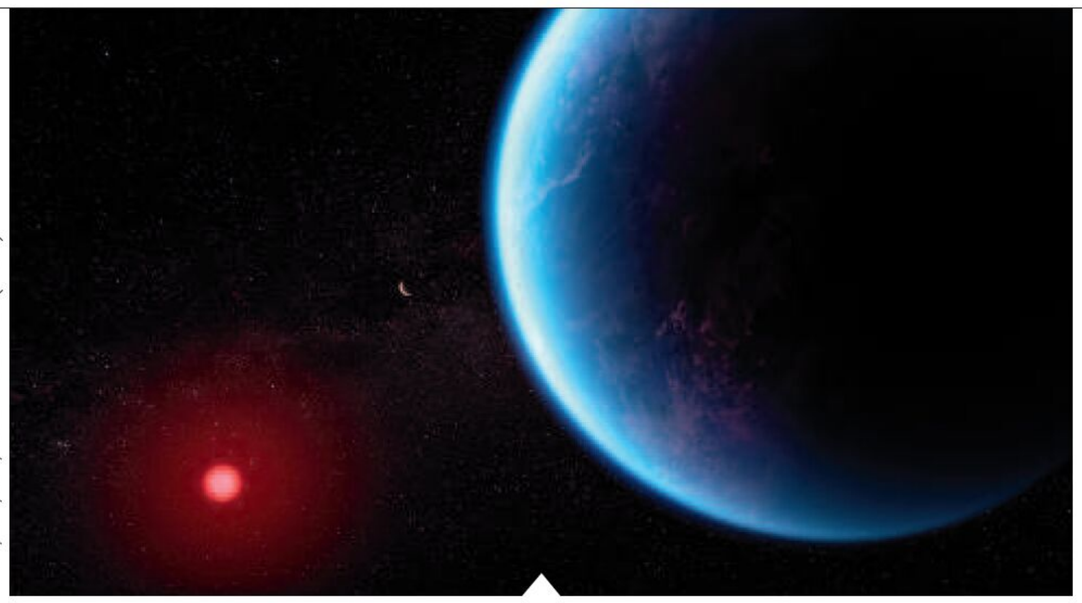
« C'est, de loin, la plus grande quantité de matière astéroïdale collectée jusqu'à présent », jubile Antonella Barrucci, planétologue à l'Observatoire de Paris et médaille d'argent de la Nasa pour ses contributions à la caractérisation de Bénou. En 2010, le Japon avait récupéré moins d'un milligramme de l'astéroïde Itokawa, et il y a trois ans, 5,4 g de Ryugu.

70 % des échantillons de Bénou seront conservés par la Nasa pour les générations futures et 5 % seront cédés aux agences spatiales canadienne et japonaise. Le reste sera examiné dans les mois et années à venir par des chercheurs du monde entier, notamment en France à l'observatoire de la Côte d'Azur. Ces analyses fourniront des informations inédites sur la naissance du Système solaire. Car Bénou, qui mesure 500 m de diamètre, est *« un astre extrêmement primitif, vestige des ingrédients de base qui ont conduit à la formation des planètes il y a 4,5 milliards d'années »*, indique Antonella Barrucci. Contrairement aux milliers de météorites récupérées sur Terre, les échantillons de Bénou n'ont pas été altérés en traversant l'atmosphère ou en séjournant sur le sol. Et ce n'est pas tout : *« L'eau et les molécules organiques — peut-être des sucres, des acides gras ou des composés azotés — seront très précieuses pour percer les mystères des origines de la vie sur notre planète »*, assure Antonella Barrucci. ■ **F. D.**

150 000 dollars

La première amende pour abandon de débris dans l'espace

SPATIAL Pour la première fois, la Commission américaine des communications a infligé une amende de 150 000 dollars (143 000 euros environ) à une entreprise du secteur spatial — Dish Network — pour avoir abandonné l'épave d'un satellite sur une orbite jugée dangereuse. **H. J.**



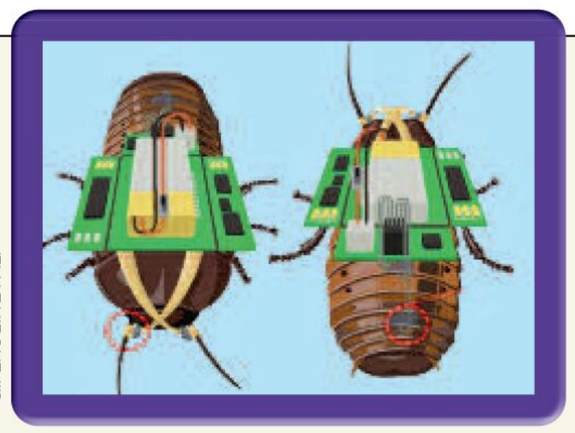
NASA, ESA, CSA, JOSEPH OLMSTED (STSCI)

K2-18 b (vue d'artiste) abriterait aussi un océan de glace.

Un biomarqueur sur une exoplanète

Le sulfure de diméthyle détecté sur cet astre est produit sur Terre par le phytoplancton.

À 124 années-lumière, dans la fine atmosphère de l'exoplanète K2-18 b, constituée principalement d'hydrogène et d'un soupçon de vapeur d'eau, le télescope James-Webb a décelé du méthane et du dioxyde de carbone, à hauteur de 1 %. Les premières observations de cette exoplanète située dans la zone d'habitabilité d'une naine rouge — une étoile plus petite et moins chaude que le Soleil — ont surtout abouti à l'identification d'une autre molécule appelée sulfure de diméthyle. Sur Terre, elle est produite par le phytoplancton et constitue donc un biomarqueur. Des analyses complémentaires seront nécessaires pour confirmer sa présence. La grande taille de l'exoplanète (un rayon de 2,6 fois celui de la Terre pour un peu moins de huit fois sa masse) suggère qu'elle abrite un vaste manteau de glace à haute pression recouvert d'une surface océanique. Toutefois, il est possible que l'océan de surface soit trop chaud pour être habitable ou même liquide. **J. I.**



QIFENG LIN ET AL.

À VOIR SUR LE NET

Un cafard secouriste téléguidé

BIOROBOTIQUE Une équipe d'ingénieurs a trouvé un moyen de contrôler électroniquement les blattes, sans les blesser. Destinées à en faire des agents de recherche lors de catastrophes naturelles, les précédentes tentatives intervenaient sur le système nerveux des insectes, réduisant leur longévité. Cette fois, les impulsions électriques sont délivrées directement sur les antennes des cafards cyborgs. **H. J.**

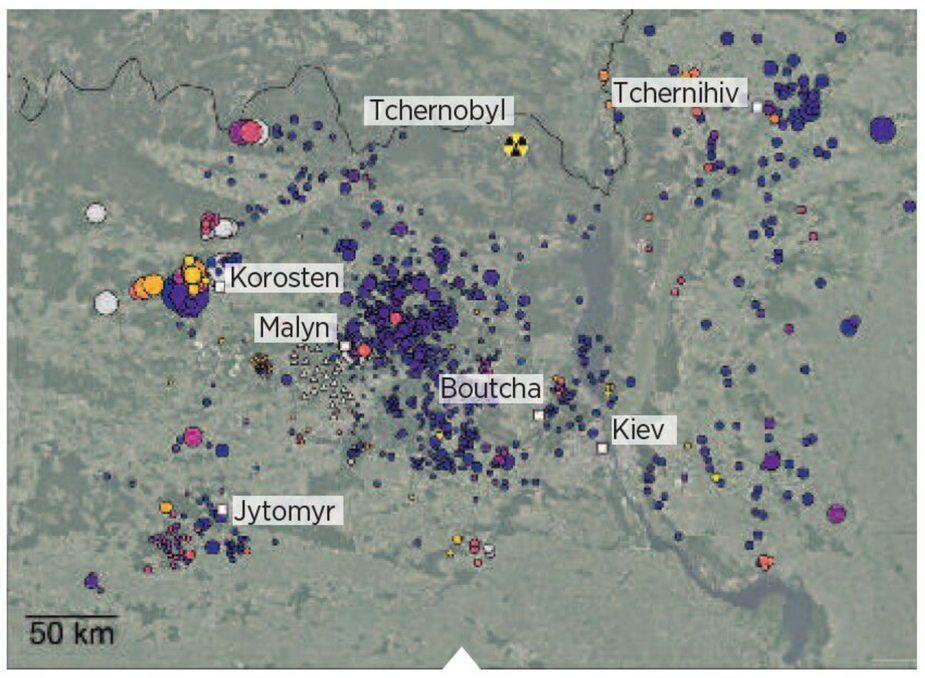
SOURCE : QIFENG LIN, UNIVERSITÉ TECHNOLOGIQUE DE NANYANG, SINGAPOUR.

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Une carte sismique révèle l'intensité de la guerre en Ukraine

SISMOLOGIE Les données de 23 capteurs sismiques et acoustiques présents au nord-ouest de Kiev ont été exploitées afin d'évaluer au plus près le nombre de frappes aériennes en Ukraine. La méthode, utilisée pour la première fois pour des explosions non nucléaires, a recensé 1282 attaques dans la région entre le 24 février et le 3 novembre 2022 lors de la première phase de la guerre menée par la Russie, soit près du double de ce qui a été officiellement rapporté. **S. C.**

SOURCE : BEN DANDO, NORSAR, NORVÈGE.



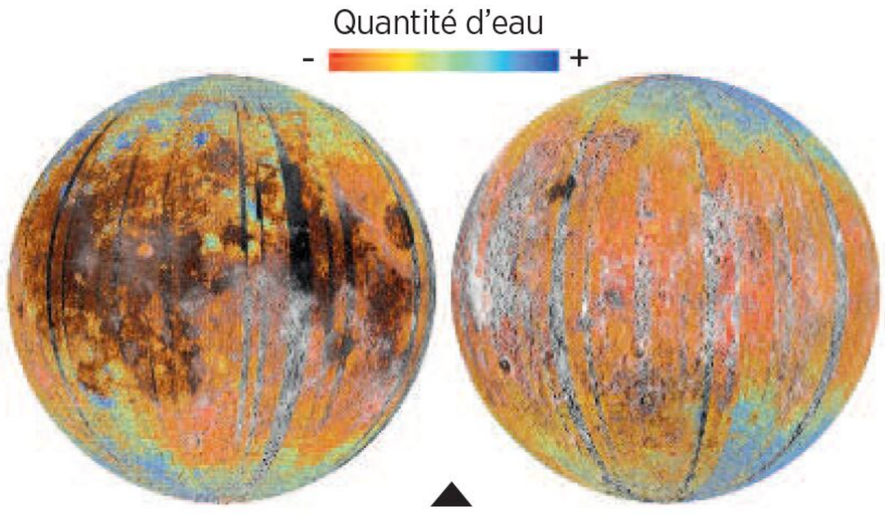
BEN D. E. DANDO ET AL.

1282 attaques aériennes ont été captées par les sismographes entre le 24 février et le 3 novembre 2022 (la taille des cercles correspond à la magnitude enregistrée).

Une soie d'araignée ultrarésistante

MATÉRIAUX Des chercheurs ont synthétisé de la soie d'araignée à partir de vers à soie génétiquement modifiés. La fibre est six fois plus résistante que le Kevlar des gilets pare-balles. L'élevage intensif des vers à soie permettrait d'envisager une production à moindre coût. Une alternative aux fibres synthétiques issues de combustibles fossiles, source de pollution aux microplastiques. **F. N.**

SOURCE : JUNPENG MI, UNIVERSITÉ DE DONGHUA, CHINE.



Répartition des quantités d'eau sur les deux faces de la Lune.

Des électrons terrestres produiraient de l'eau lunaire

ASTROPHYSIQUE Lorsque la Lune traverse la queue du champ magnétique terrestre chaque mois, des électrons de haute énergie frappent la surface de notre satellite et contribueraient ainsi à la production de molécules d'eau en réagissant avec des composés contenant de l'oxygène à la surface. Sous réserve de confirmation, l'étonnante découverte pourrait aider à mieux comprendre la répartition de l'eau lunaire. **H. J.**

SOURCE : SHUAI LI, UNIVERSITÉ D'HAWAII, ÉTATS-UNIS.

LI ET AL.

Les premiers « cris » d'une étoile naissante

ASTRONOMIE Au centre de l'image, mais masquée par la poussière, la protoétoile HH211, située à 1000 années-lumière dans la constellation de Persée, n'est âgée que de quelques dizaines de milliers d'années. Ce bébé turbulent saisi par le télescope James-Webb, qui ressemblera un jour au Soleil, crache deux puissants jets de gaz à 100 km/s. **F. N.**

ESA/WEBB, NASA, CSA, TOM RAY (DUBLIN)

Le laser à rayons X qui bat tous les records

Aux États-Unis, le LCLS-II peut générer jusqu'à un million de flashs de rayons X par seconde.

Les États-Unis repassent en tête dans la course aux lasers à rayons X, machines pouvant ausculter de façon rapide et précise une variété de systèmes allant des biomolécules à l'intérieur des planètes. Depuis mi-septembre, à Stanford, le laser LCLS-II (Linac Coherent Light Source II) peut générer jusqu'à un million de flashs de rayons X par seconde, 8000 fois plus que la version précédente. Il surpasse ainsi son principal rival, la machine européenne XFEL inaugurée en 2017 en Allemagne (27 000 flashs par seconde). Pour cela, LCLS-II accélère des électrons à une vitesse proche de celle de la lumière sur un kilomètre de distance. Puis des aimants très puissants font osciller ces électrons qui émettent alors des flashs de rayons X. Coût des opérations : 1,1 milliard de dollars. **F. D.**

MARILYN CHUNG/BERKELEY LAB

Ce dispositif produit les électrons qui seront ensuite accélérés.

La Chine révolutionne la communication quantique

INFORMATIQUE Tout comme les machines actuelles, les futurs ordinateurs quantiques devront être reliés pour échanger des informations. Dans cet esprit, la ville de Heifei (Chine) dispose désormais d'un réseau de communication quantique couvrant une surface de 7048 km². Un record permis par une architecture en triangle, avec trois nœuds quantiques intriqués sur de grandes distances (jusqu'à 12,5 km entre deux des nœuds). **F. N.**

SOURCE : JIAN-LONG LIU, UNIV. DE SCIENCE ET TECHNOLOGIE DE CHINE.

L'antimatière n'antigravite pas

PHYSIQUE Un atome d'antimatière tombe comme un atome de matière, selon de nouveaux résultats de l'expérience Alpha du Cern, à Genève (Suisse). Celle-ci tente depuis des années de détecter une différence, soit dans la vitesse de chute, soit dans le sens de la chute. Notamment une antimatière qui antigraviterait, et donc fuirait la matière, aurait permis de comprendre pourquoi ce double de la matière, avec certaines propriétés inversées comme la charge électrique, a disparu peu après le Big Bang. **F. N.**

SOURCE : E. ANDERSON, UNIVERSITÉ D'AARHUS, DANEMARK.

bouygues TELECOM

BETC Bouygues Telecom – Société anonyme au capital de 929 207 595,48 € – Siège social : 37-39, rue Boissière – 75116 PARIS – 397 480 930 RCS PARIS.

Avec les Solutions sécurité smartphone incluses dans tous nos forfaits Bouygues Telecom, nous vous aidons à vous protéger face aux messages frauduleux et aux tentatives de piratage.

solutions sécurité smartphone
norton

en boutique | bouyguestelecom.fr

Offres soumises à conditions. Service Norton inclus pendant 24 mois à compter de la souscription à un forfait Bouygues Telecom avec engagement 12 ou 24 mois.

ZHANG LIANHUA / COSTFOTO/SIPA

La mutualisation s'opère seulement lorsqu'on mélange les variétés, et non entre des clones.

Les plantes ont des relations sociales

Une équipe franco-chinoise a démontré que deux variétés de blé ou de riz peuvent instaurer un dialogue qui améliore leur résistance aux maladies.

Si l'on mélange des variétés de blé au lieu d'en semer une seule, la plante est plus résistante aux maladies. C'est ce que constatent les agriculteurs. C'est ainsi que, sans le dire, la pratique du mélange de variétés, pourtant déconseillée voire prohibée par l'agro-industrie, se répand dans les campagnes. Comment l'expliquer ? Des chercheurs de l'Inrae, de l'institut Agro Montpellier, du Cirad, du CNRS et de l'université agricole du Yunnan (Chine) viennent d'apporter une réponse : le blé, comme le riz, a des relations sociales ! *« Un pied de blé ou de riz a en quelque sorte connaissance que le pied voisin n'est pas lui-même, ce qui en retour implique une prise de "conscience de soi"*, s'émerveille Jean-Benoît Morel, chercheur à l'Institut de santé des plantes de Montpellier et coauteur de l'étude. *Et cela n'existe pas quand votre voisin est un clone de vous.* »

Une communication qui passe par le sol

Pour mettre en évidence cette faculté, les chercheurs ont étudié en laboratoire plus de 200 appariements de deux pieds d'une même variété de blé (des clones, donc) et de deux variétés différentes. Puis, ils ont inoculé des champignons pathogènes à l'un des individus de chaque paire et comparé la résistance au sein de ces paires. *« Certaines associations de riz ou de blé réduisent de 90 % la sensibilité à la maladie de la plante infectée,* poursuit Jean-Benoît Morel. *C'est-à-dire que ce voisinage entre individus de même espèce mais différents (comme vous et moi) est aussi efficace pour combattre la maladie que certains gènes de résistance que la plante pourrait posséder.* » Comment cette relation fonctionne-t-elle ? La communication passe par le sol. Les chercheurs ont en effet séparé des plantes appariées par des obstacles qui ont coupé l'échange. Mais les milliards de bactéries, virus, champignons, archées qui peuplent les premiers centimètres de terre ne semblent pas avoir de rôle d'agent transmetteur. La mutualisation s'opère en effet même sur des sols stérilisés. Ce mystère ouvre ainsi une nouvelle voie de recherche avec la promesse de réduire l'usage des pesticides. ■ **L. C.**

ELLE A DIT

« Quand on conçoit un barrage, il faut avoir une bonne compréhension des précipitations. Mais avec les changements climatiques, c'est de plus en plus difficile à prévoir »

Liz Stephens, experte en risques climatiques à l'université de Reading (Royaume-Uni) commentant la rupture des barrages près de Derna en Libye à la suite de la tempête Daniel, qui a causé des milliers de victimes.

Des escargots lumineux en Thaïlande

MALACOLOGIE Plusieurs espèces d'escargot du genre *Phuphania* vivant en Thaïlande produisent une lumière verte grâce à des cellules spécialisées situées autour de leur pied et dans leur manteau, rapportent des chercheurs. La production de ce type de lumière, plus fréquente chez les mollusques marins (notamment les céphalopodes), doit avoir un rôle qui reste à explorer. **P. K.**

SOURCE : ARTHIT PHOLYOTHA, UNIVERSITÉ CHULALONGKORN, THAÏLANDE.

ARTHIT PHOLYOTHA ET AL.

« Phuphania globosa » sous lumière naturelle (en haut) et sous lumière UV (en bas).

JAMANI CAILLET / EPFL

L'expérience a été menée sur les eaux usées d'une brasserie de Lausanne (Suisse).

De l'électricité produite par une bactérie

BIO-INGÉNIERIE Une équipe suisse est parvenue à modifier génétiquement la bactérie *Escherichia coli* pour qu'elle puisse produire de l'électricité en se nourrissant de déchets organiques. Ainsi armé pour traiter des eaux usées tout en fabriquant de l'énergie, le micro-organisme électrogénique facile à faire proliférer pourrait être utilisé dans des piles microbiennes voire à plus large échelle dans le traitement des déchets. **S. C.**

SOURCE : M. MOUHIB, EPFL, SUISSE.

Aux origines tectoniques des diamants roses

Découvertes en Australie, ces pierres seraient âgées de plus de 1,6 milliard d'années.

TRAFFIC STUDIA #6 / NATURE PUBLISHING GROUP / AFP

Ces roches magmatiques sont remontées du manteau supérieur de la Terre.

Les diamants roses d'Australie sont non seulement très rares mais aussi extrêmement anciens, révèle une étude pilotée par des géologues australiens qui ont pu dater leur origine à plus de 1,6 milliard d'années. Issus de l'ancienne mine d'Argyle située dans le nord-ouest du pays, ils appartiennent à un filon de roche magmatique dont l'infiltration vers la surface s'est produite il y a 1,3 milliard d'années, selon des mesures faites à partir d'isotopes de l'uranium et du plomb. À cette époque, le supercontinent de Columbia (ou Nuna) se déchirait en plusieurs parties et l'amincissement de la croûte continentale a favorisé des remontées de magma du manteau supérieur où s'étaient déjà cristallisés les diamants, à plus de 150 km de profondeur et 1100 °C. Leur couleur rose serait une conséquence des pressions énormes résultant de la fusion des plaques tectoniques qui a formé le supercontinent il y a plus de 1,6 milliard d'années. Ce n'est qu'au début du crétacé, il y a 120 millions d'années, que ces roches sont remontées à moins de 2 km de la surface pour devenir accessibles à l'extraction minière, indiquent les chercheurs. **P. K.**

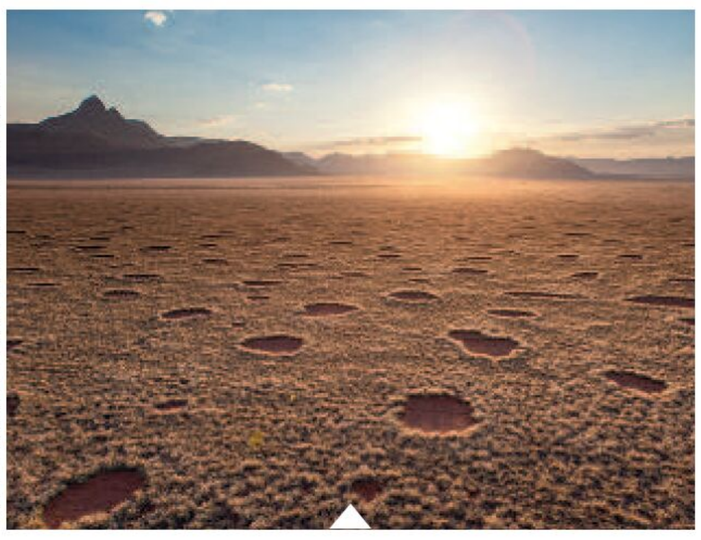
EN DEUX MOTS

DENDROLOGIE L'Ilex de Pernambouc (*Ilex sapiiformis*), une espèce d'arbre qu'on croyait éteinte, a été retrouvée lors d'une expédition près de Recife au Brésil. **ZOONOSE** Une campagne de vaccination inédite a été lancée en octobre en France pour protéger 64 millions de canards de la grippe aviaire. **BOTANIQUE** Une équipe allemande montre que le piège à mouche de Vénus, plante carnivore la plus connue, est capable de détecter des incendies et de refermer ses mâchoires pour s'en protéger.

Un atlas mondial des cercles de fées

BIOGÉOGRAPHIE Un programme d'apprentissage profond entraîné à partir des cercles de fées en Namibie et en Australie a permis de réaliser, au moyen d'images satellite, un recensement inédit de ces mystérieux disques de terre nue persistant au milieu d'étendues herbeuses. Les chercheurs en ont ainsi découvert au Sahel, à Madagascar, en Asie centrale et du Sud-Ouest et dans la Corne de l'Afrique. Leur formation, elle, reste inexpliquée. **P. K.**

SOURCE : EMILIO GUIRADO, UNIVERSITÉ D'ALICANTE, ESPAGNE.



L. FROST / R. HARDING PICTURE LIBRARY / BIOSPHOTO

La formation de ces disques de terre nue (ici en Namibie) demeure énigmatique.

4805,59 mètres

La nouvelle altitude du mont Blanc

GÉOLOGIE Le plus haut sommet d'Europe à Chamonix (France) a rapetissé de 2,22 m depuis l'évaluation de 2021 (4807,81 m), loin de son plus haut de 2007 (4810,90 m). L'altitude oscillant continuellement, les géomètres chargés de la mesure officielle tous les deux ans n'en tirent aucune conclusion sur l'effet du climat. Sous les neiges éternelles, le sommet rocheux culmine toujours à 4792 m. **H. J.**

L'« Anita Conti » intègre des bouteilles d'hydrogène (en vert) dans sa partie avant (illustration).

COPREXMA

Un chalutier teste l'hydrogène en Bretagne

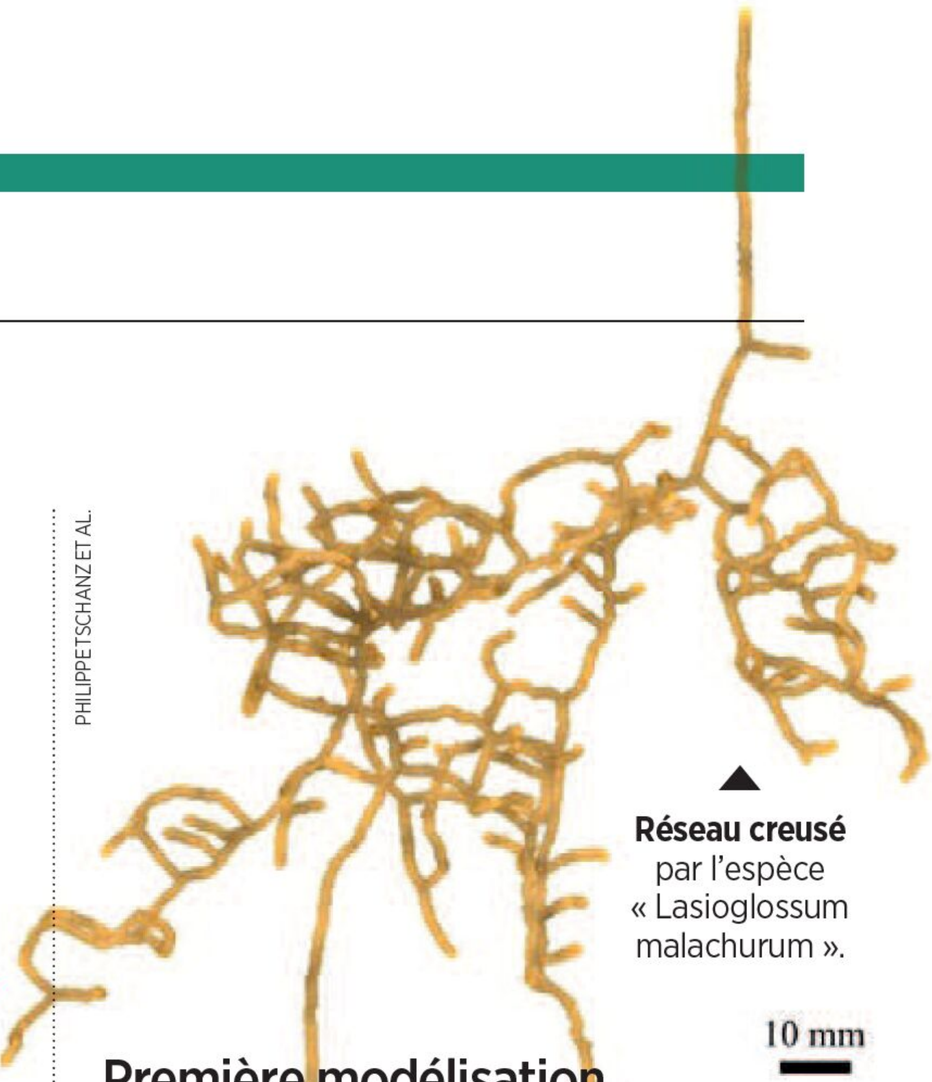
ÉNERGIE L'interprofession du port de Concarneau (Finistère) a présenté les premiers résultats de son programme de décarbonation des chalutiers par hydrogène. Le test effectué par l'*Anita Conti*, un chalutier de 17 m, de deux piles à combustible de 40 kW pour produire l'électricité à bord et alimenter les apparaux de pêche, a montré une diminution de 15 % de la consommation de gazole. Lequel reste nécessaire pour les trajets et le tractage du chalut. Un résultat qui intervient alors que les pêcheurs s'inquiètent de l'arrêt de la défiscalisation du gazole annoncé fin septembre. **L. C.**

L'Antarctique se réchauffe plus vite que la planète

CLIMATOLOGIE
L'examen de 78 carottes de glace prélevées sur l'ensemble de l'Antarctique révèle que le continent blanc se réchauffe deux fois plus vite que le reste du globe. Jusqu'ici, les trois stations météo couvrant le vaste territoire n'indiquaient pas de hausse des températures, alors qu'on sait que l'Arctique se réchauffe quatre fois plus vite que l'ensemble de la planète. Fin du mystère, donc, et confirmation que les Pôles sont davantage affectés que les latitudes inférieures. L. C.

SOURCE : MATHIEU CASADO, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

PHILIPPE TSCHANZ ET AL.



Réseau creusé par l'espèce « Lasioglossum malachurum ».

Première modélisation d'un terrier d'abeille

ENTOMOLOGIE Près de 85 % des espèces d'abeilles nichent dans le sol et, pour la première fois, des chercheurs ont pu reconstruire numériquement l'architecture de terriers et figurer ainsi la façon dont ces insectes construisent leurs repaires. Ils ont pour cela fait creuser des abeilles de deux espèces dans des pots de terre et les nids obtenus ont ensuite été visualisés grâce à un scanner hospitalier. **H. J.**

SOURCE : PHILIPPE TSCHANZ, INSTITUT DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE ZURICH, SUISSE.

JAN BIELECKI

« Tripedalia cystophora », une espèce mesurant un centimètre de diamètre, a appris à repérer et éviter des obstacles.

Cette méduse apprend sans cerveau

Même les systèmes nerveux les plus rudimentaires sont capables d'apprentissage avancé.

« *Ce qui nous a surpris, c'est la rapidité avec laquelle elles apprennent* », raconte Jan Bielecki, neurobiologiste à l'université de Kiel (Allemagne). « Elles », ce sont de petites méduses caribéennes nommées *Tripedalia cystophora*. Dépourvus de cerveau, ces cnidaires d'un centimètre de diamètre sont pourtant en mesure d'associer deux stimuli comme des animaux pourvus d'un système nerveux centralisé. L'équipe a entraîné les méduses dans un réservoir rond tapissé de rayures reproduisant leur habitat naturel : les mangroves, ces marais maritimes dont l'abondante végétation strie l'eau de ses racines. Il s'est avéré qu'elles étaient capables, en quelques essais, de reconnaître et d'éviter les pièges tendus par les scientifiques dans ce nouveau milieu. Preuve d'un apprentissage associatif rapide.

C. G.

HONDA

Découvrez la nouvelle
Gamme SUV Honda électrifiée :
100% Électrique, Hybride intégral
ou Hybride rechargeable.

Conçu pour durer

JUSQU'À 10 ANS DE GARANTIE MOTEUR OFFERTE*

e:Ny1

A 0 gCO_2/km
B
C
D
E
F
G

ZR-V

A
B
C 132 gCO_2/km
D
E
F
G

HR-V

A
B
C 122 gCO_2/km
D
E
F
G

CR-V

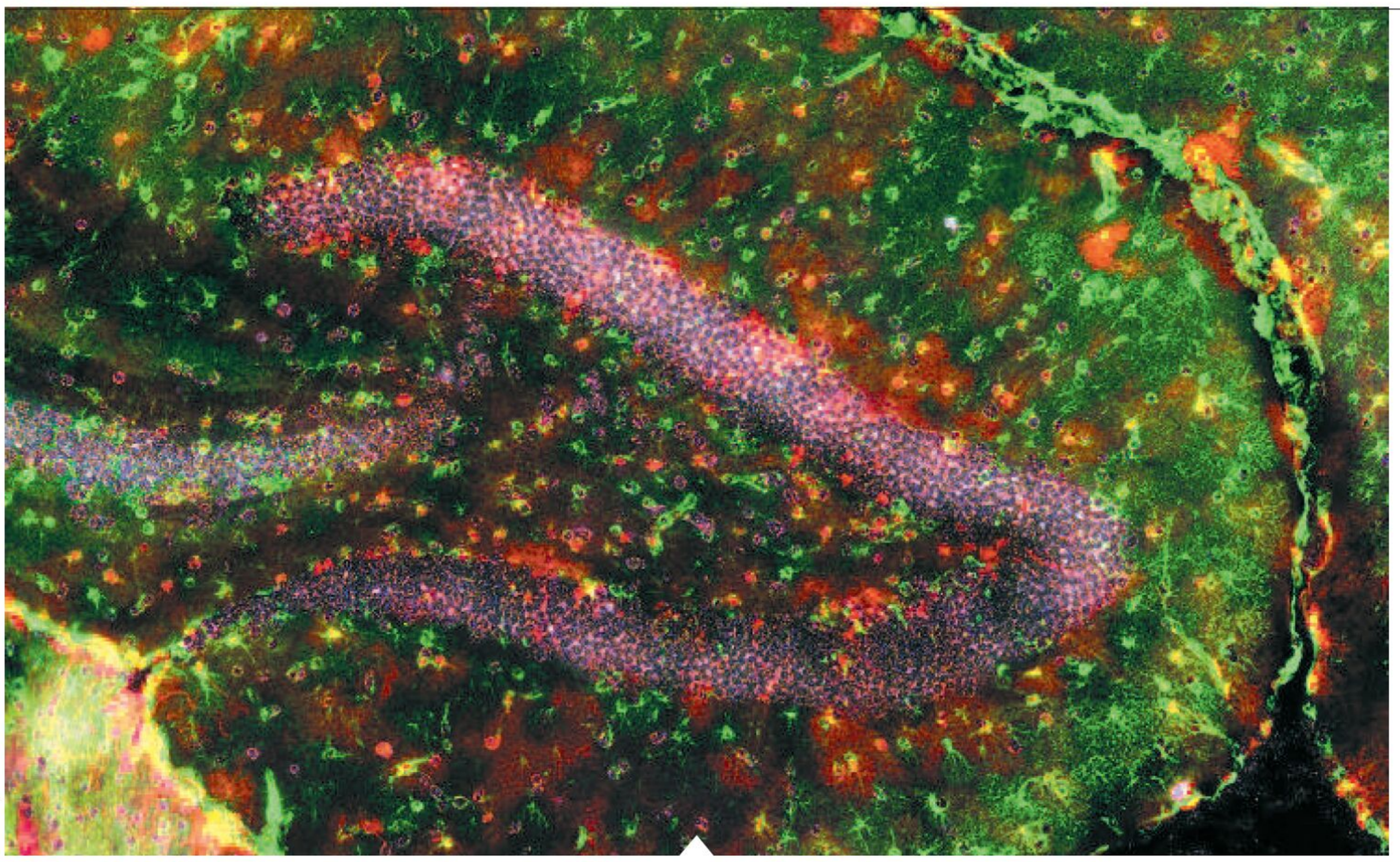
A
B
C 134 gCO_2/km
D
E
F
G

Découvrez quelle Honda électrifiée est faite pour vous et toutes nos offres sur honda.fr

Consommations mixtes WLTP min - max et émissions de CO_2 mixtes WLTP min - max : e:Ny1 18,2 - 18,2 kWh/100 km et 0 g/km ; ZR-V 5,7 - 5,8 l/100 km et 130 - 132 g/km ; HR-V 5,4 - 5,4 l/100 km et 122 - 122 g/km ; CR-V 0,8 - 6,7 l/100 km et 18 - 151 g/km.

*Sous réserve du suivi régulier de l'entretien Honda selon les préconisations constructeur et les indications de l'ordinateur de bord. Offre soumise à d'autres conditions disponibles sur auto.honda.fr. **Garanties des batteries: électriques 8 ans, hybrides 5 ans, standards 3 ans.** Honda Motor Europe Limited (France) Parc d'activités de Pariest, Allée du 1er Mai – Croissy Beaubourg BP 46 – 77312 MARNE-LA-VALLEE Cedex 02 (FRANCE) – Enregistré au RCS sous le SIRET : 509 243 564 00028.

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo #SeDéplacerMoinsPolluer



TELLEY/VOLTERRA UNIL

Différents sous-types d'astrocytes sont ici visualisés dans l'hippocampe d'une souris.

De cellules cérébrales d'un nouveau type

Décrites comme des hybrides à mi-chemin entre neurones et cellules gliales, elles ouvrent la voie à des thérapies innovantes.

Jusqu'à présent, les scientifiques pensaient que seuls deux types de cellules composaient notre cerveau : environ 40 % de neurones, excitables électriquement, qui traitent et transmettent les informations, et 60 % de cellules gliales assurant le soutien biologique et la protection des tissus nerveux. Mais une équipe de l'université de Lausanne, en Suisse, vient d'en identifier un troisième.

Dans leur étude publiée par la revue *Nature*, ils décrivent un type cellulaire hybride, qu'ils ont baptisé « astrocyte glutamatergique », à mi-chemin entre le neurone et l'astrocyte, une cellule gliale en forme d'étoile. Les astrocytes sont notamment chargés de la régulation des synapses, zone assurant la transmission des informations entre deux neurones par l'échange de neurotransmetteurs.

Un effet protecteur de la mémoire

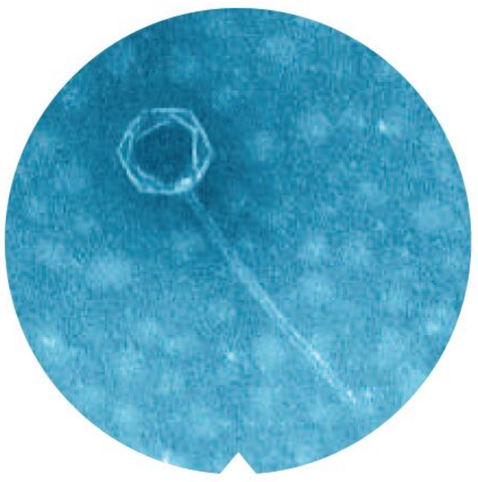
« On savait que les astrocytes émettaient des molécules utiles pour les synapses, mais étaient-ils capables de sécréter des neurotransmetteurs, avec une machinerie aussi raffinée et rapide que celle des neurones pour assurer le passage de l'information ? Telle était la question », explique Andrea Volterra qui a dirigé la recherche. C'est bien le cas : le type cellulaire hybride identifié est même un spécialiste du glutamate, un neurotransmetteur qu'il sécrète aussi vite que des neurones.

Les expériences sur la souris ont montré que ces cellules contrôlaient le niveau d'excitation des neurones, avec notamment un effet protecteur contre les crises d'épilepsie. Et sur la mémoire aussi ! *« Lorsqu'on inhibait leur fonctionnement, les souris ne se souvenaient pas bien de ce qu'elles avaient appris la veille »*, ajoute Andrea Volterra. Ayant pu confirmer leur présence dans le cerveau humain, l'équipe s'attache désormais à déterminer leur rôle dans des pathologies comme Alzheimer. Et peut-être, à terme, concevoir de nouvelles stratégies thérapeutiques en ciblant cette population atypique. **M. P.**

Une IA pour détecter les mutations délétères

GÉNÉTIQUE La société DeepMind (Google) a présenté dans *Science* un programme d'intelligence artificielle, AlphaMissense, capable de prédire si une mutation ponctuelle d'un gène dans l'ADN est susceptible, ou non, d'affecter le fonctionnement de la protéine qu'il code, et donc de déclencher une maladie. L'outil, dont le code a été librement publié, découle des résultats du programme AlphaFold permettant de prédire la structure des protéines. **P. K.**

SOURCE : JOSEPH MARCH, UNIVERSITÉ D'ÉDIMBOURG, ROYAUME-UNI.



SU ET AL.

Ce siphovirus ne s'attaque pas à l'humain mais aux bactéries.

Découverte d'un virus des abysses

VIROLOGIE À 8900 mètres de profondeur, dans la fosse des Mariannes (Pacifique nord-ouest), des chercheurs ont identifié un nouveau virus, baptisé vB_HmeY_H4907. Il ne présente pas de risque pour l'humain puisqu'il est bactériophage. Les chercheurs l'ont d'ailleurs trouvé en analysant des bactéries infectées dans des échantillons de couche sédimentaire de la fosse la plus profonde au monde. **M. P.**

SOURCE : YUE SU, UNIVERSITÉ OCÉANIQUE DE CHINE.

YASUYOSHI CHIBA / AFP

260 000 enfants par an meurent de la maladie en Afrique.

Un deuxième vaccin contre le paludisme validé par l'OMS

INFECTIOLOGIE L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a donné son feu vert à l'utilisation d'un deuxième vaccin contre le paludisme, maladie parasitaire transmise par des moustiques, à l'origine de 619 000 morts en 2021. À la différence du premier, Mosquirix (laboratoire GSK), autorisé en 2021 pour les nourrissons âgés de 6 semaines à 17 mois, le nouveau R21/Matrix-M développé à l'université d'Oxford (Royaume-Uni) peut être administré aux enfants à risque âgés de 6 à 16 ans. L'agence sanitaire s'attend à des demandes allant jusqu'à 60 millions de doses par an d'ici à 2026. **H. J.**

ELLE A DIT

« Comme pour les intestins, la peau ou les muqueuses, on se rend compte que le microbiote pulmonaire joue un rôle dans l'évolution de certaines pathologies »

Carmen Buchrieser, directrice de l'unité Biologie des bactéries intracellulaires à l'Institut Pasteur, à Paris, commentant son étude montrant chez 38 patients atteints de légionellose le rôle de leur microbiote pulmonaire dans la sévérité de la maladie.

Une neuroprothèse pour les bras des tétraplégiques

NEUROCHIRURGIE Un patient tétraplégique de 46 ans a été greffé de deux implants, l'un au cerveau et l'autre à la moelle épinière, dans l'espoir de lui faire retrouver l'usage de ses bras. Une technique d'interface cerveau-machine qui a déjà permis à des patients de retrouver l'usage de leurs jambes par la pensée *(lire* S. et A. *n° 917). « Mais la mobilité du bras est bien plus complexe »*, a prévenu Jocelyne Bloch, neurochirurgienne du CHU Vaudois (Suisse) qui a réalisé et annoncé l'opération. **H. J.**

ONWARD

Ces boîtiers sont reliés aux implants du patient.

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Chez votre marchand de journaux

29 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

CEDRIC HELSLY

QUESTIONS À

Dr Emmanuel Ricard

Responsable de la prévention à la Ligue contre le cancer

Papillomavirus : « Ces cancers touchent n'importe qui »

Une campagne de vaccination contre les papillomavirus humains (HPV) a débuté le 2 octobre dans les collèges en France. Retour sur les raisons de protéger, dès l'adolescence, filles et garçons contre ces virus responsables de 6400 cas de cancers par an dans l'Hexagone.

Pourquoi la recommandation du vaccin a-t-elle été étendue aux garçons dès l'âge de 11 ans ?
D'abord, ils peuvent aussi être touchés par des cancers. Surtout, une récente étude a montré qu'un quart des hommes, dès leurs premiers rapports sexuels autour de 15 ans, sont porteurs d'un type cancérogène du virus. Cette donnée justifie à elle seule l'extension de la vaccination aux garçons à cet âge.

Comment se transmettent ces virus ?
Les HPV touchent énormément de monde car ils sont très contagieux, non seulement par tous les types de relations sexuelles mais aussi par le contact peau à peau. Ils résistent à l'air et — tout comme les verrues — il suffit de frottements corporels, de chatouilles ou de masturbations pour qu'ils se transmettent.

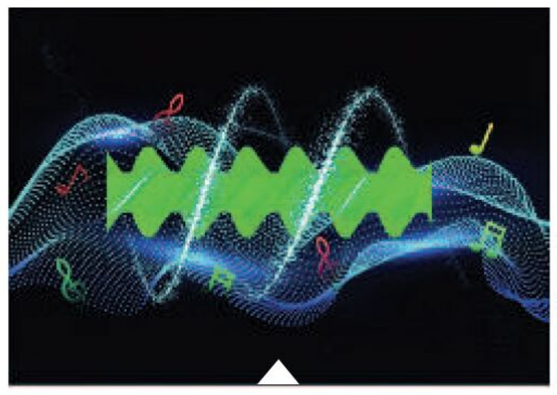
Ce sont donc des virus courants ?
Environ 80 % de la population, hommes et femmes confondus, seront contaminés par un papillomavirus lors de leur vie sexuelle, donc oui. Il ne faut pas imaginer que c'est un virus ne touchant que les gens ayant une sexualité débridée ou particulière. Les cancers qu'ils induiront à terme peuvent toucher n'importe qui. Or, les récentes études de l'Inserm ont balayé les doutes sur ce vaccin : il est sûr et efficace.

Propos recueillis par C. L.

Un microrobot thérapeutique guidé par ultrasons

BIO-INGÉNIERIE En forme de *rotini*, une pâte torsadée, ce microrobot hélicoïdal mesure 350 micromètres de long pour 100 µm de diamètre. Il a été conçu pour s'infiltrer dans la circulation sanguine et y déposer des molécules thérapeutiques. Pour être guidé avec précision, sa microstructure à double hélice répond aux stimuli ultrasonores. Elle est inspirée des spirochètes, des bactéries spiralées et mobiles. **H. J.**

SOURCE : YONG DENG, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZURICH, SUISSE.



YONG DENG ET AL.

La structure hélicoïdale se propulse en réponse à un champ acoustique.

GETTY IMAGES

Des mutations rares sont liées à la perte des cheveux.

De nouvelles causes génétiques de l'alopécie

DERMATOLOGIE En associant plusieurs méthodes de bio-informatique et de génomique, une équipe a pu passer au crible les séquences génétiques de 72 469 hommes âgés de 39 à 82 ans. Elle a ainsi découvert de nouvelles mutations rares impliquées dans la perte de cheveux. En tout, plus de 350 variants sur cinq gènes peuvent induire l'alopécie, qui finit par toucher 80 % des hommes européens. **C. L.**

SOURCE : SABRINA KATRIN HENNE, UNIVERSITÉ DE BONN, ALLEMAGNE.

De l'ecstasy contre le stress post-traumatique

PSYCHIATRIE Un essai clinique de phase 3 — ultime étape avant une possible commercialisation — a confirmé que les thérapies associées à une prise du principe actif de l'ecstasy, la MDMA, réduisaient de façon significative les troubles du stress post-traumatique modéré à sévère. Administré dans 11 sites différents aux États-Unis et deux en Israël, le traitement a été bien toléré chez les 104 patients à l'exception de cinq cas d'événements indésirables. **H. J.**

SOURCE : JENNIFER MITCHELL, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE SAN FRANCISCO, ÉTATS-UNIS.

Un traitement efficace contre la narcolepsie

NEUROLOGIE Des résultats spectaculaires ont été enregistrés lors d'un essai clinique de phase 2 contre la narcolepsie, maladie caractérisée par la difficulté à rester éveillé. Pour la première fois, des patients ont rapporté se sentir guéris après une prise orale du TAK-994 (laboratoire Takeda). La molécule agit dans le cerveau comme l'orexine, un neurotransmetteur dont le rôle est de stimuler l'état de veille. S. R.-M.

SOURCE : YVES DAUVILLIERS, INSTITUT DES NEUROSCIENCES DE MONTPELLIER, FRANCE.

Installer une borne de recharge en toute confiance ?

On s'en charge.

ENGIE Home Services vous accompagne pour l'installation de votre borne de recharge à domicile, c'est simple, rapide et sécurisé(1).

Plus d'infos sur mobiliteverte.engie.fr

J'agis avec ENGIE Home Services

ENGIE Home Services

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

(1) Offre disponible pour les particuliers résidant dans une maison individuelle. Voir conditions sur mobiliteverte.engie.fr

ENGIE HOME SERVICES, SAS AU CAPITAL DE 1 121 232 €, SIÈGE SOCIAL : 1 PLACE SAMUEL DE CHAMPLAIN 92400 COURBEVOIE, RCS NANTERRE 301 340 584. © Étienne Pons.

Voici la plus ancienne construction en bois

Cette structure façonnée il y a 476 000 ans par des hominidés est sans équivalent connu dans le paléolithique africain.

Et si l'âge de pierre était aussi celui du bois ? C'est la question que pose la découverte en Zambie d'une structure de bois façonnée il y a 476 000 ans par des hominidés ; une construction sans équivalent connu dans le paléolithique africain ou eurasien. Décrite dans la revue *Nature*, elle consiste en deux rondins superposés, encastrés par le biais d'une entaille en forme de U de plus de 10 centimètres de large. Ces deux morceaux de bois emboîtés l'un dans l'autre pourraient correspondre à une fondation destinée à soutenir quelque chose de plus imposant : une passerelle ou encore une plateforme pour s'asseoir, parler, manger… Selon Veerle Rots, professeure de préhistoire à l'université de Liège (Belgique) et cosignataire de l'étude, l'assemblage a *« clairement été produit par l'humain »*, comme le suggère une série de marques laissées dans le bois par des outils en pierre.

LARRY BARHAM, UNIVERSITY OF LIVERPOOL

Les deux rondins emboîtés découverts en Zambie pourraient faire partie d'une plate-forme ou des fondations d'une habitation.

L'ancêtre de « sapiens » n'a pu être identifié

En l'occurrence, il s'agirait d'ancêtres de *Sapiens* dont il est difficile de déterminer l'espèce — plusieurs espèces humaines étaient présentes en Afrique à cette époque et aucun reste anatomique n'a été retrouvé près des chutes de Kalambo, au nord du pays. C'est là, à quelques centaines de mètres des deuxièmes chutes d'eau les plus hautes d'Afrique, que la trouvaille a été faite. Soumis à des inondations régulières et ainsi gorgé d'eau depuis un demi-million d'années, le site a offert des conditions rares pour la conservation du bois. Cette découverte soulève surtout une question fondamentale : si ces hominidés prenaient le temps et la peine de construire ce type de structure, étaient-ils vraiment si nomades que les scientifiques l'ont considéré jusqu'ici ? Le débat est désormais ouvert. **M. B.**

ELLE A DIT

« Au lieu d'enterrer leurs morts, ces gens les mangeaient »

Silvia Bello, chercheuse au musée d'Histoire naturelle de Londres (Royaume-Uni), dont l'équipe a révélé les plus anciennes traces de cannibalisme dans le nord-ouest de l'Europe datées d'il y a 15 000 ans, à partir de restes humains mastiqués et retrouvés dans les gorges de Cheddar, près de Bristol.

ZHAO CHUANG

Reconstitution du théropode aviaire inconnu jusqu'ici.

En Chine, un dinosaure à longues pattes

PALÉONTOLOGIE

Fujianvenator prodigiosus **est un drôle de dinosaure à plumes vieux de 150 millions d'années, dont le fossile a été extirpé du district de Zhenghe, dans le sud-est de la Chine. De la taille d'un faisan, son allure se distingue par un tibia deux fois plus long que son fémur, une configuration semblable à celle des hérons ou des échassiers. Il vivait probablement dans des marécages et ses longues pattes lui assuraient une très bonne vitesse de pointe ! J. I.**

SOURCE : LIMING XU, INSTITUT GÉOLOGIQUE DE FUJIAN, CHINE.

Pâte suisse
BONNE NUIT

Le plaisir de s'endormir

arôme naturel de fleur d'oranger

extraits de plantes
+
mélatonine

SANS SUCRE

Disponible en pharmacie et sur lehning.com

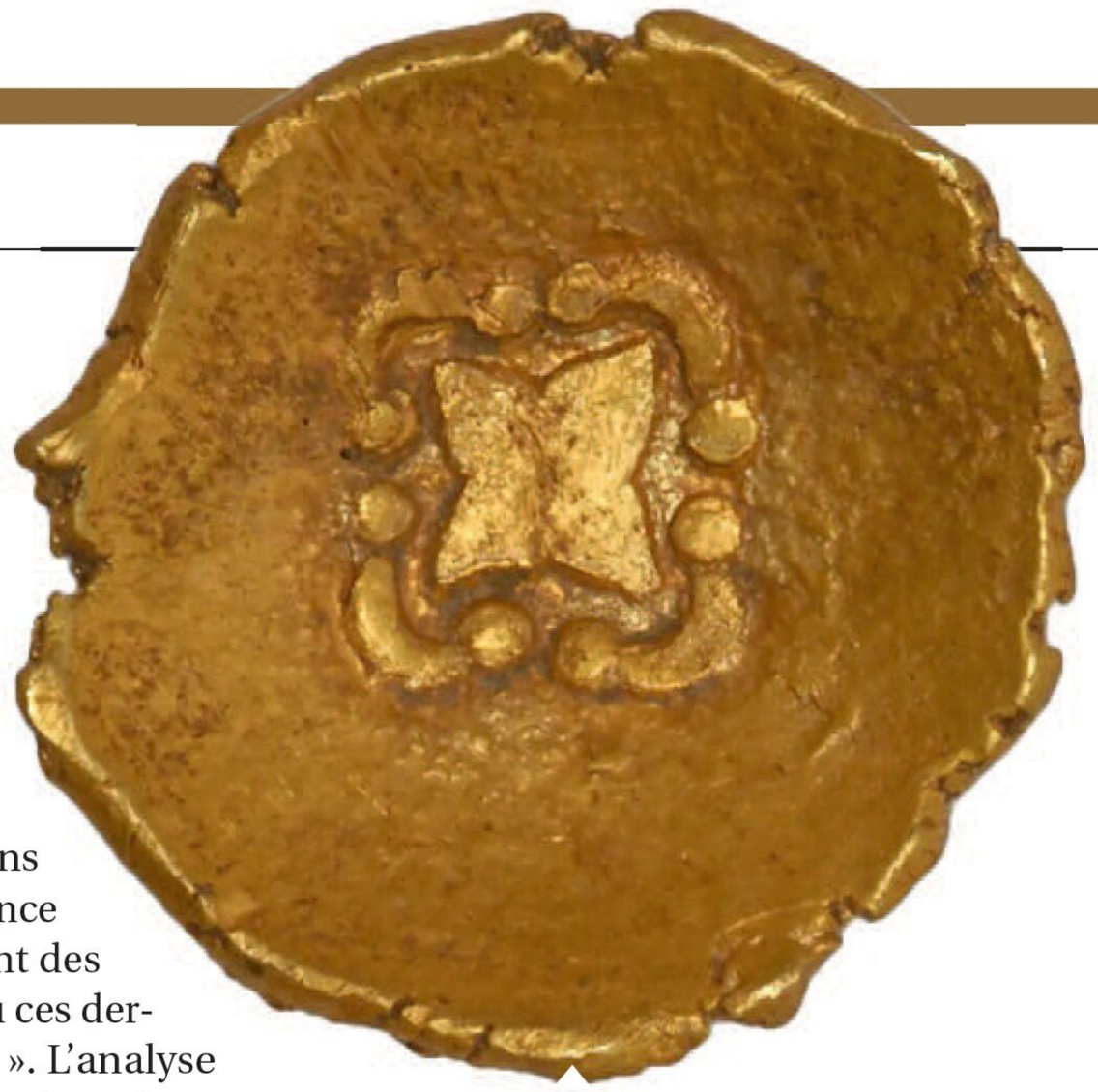
MÉDICATION VÉGÉTALE DEPUIS 1935

LEHNING
LABORATOIRES

Pour votre santé, pratiquez une activité physique régulière. www.mangerbouger.fr

Un mystérieux « bol d'arc-en-ciel »

Cette petite pièce d'or incurvée, mise au jour en Allemagne, reflétait la lumière du soleil après la pluie.



S. FRIEDRICH, ARCHAEOLOGICAL STATE COLLECTION, MUNICH

Une étoile à quatre branches entourée d'arcs orne une face de la pièce celte.

Fabriquée il y a plus de 2000 ans par des tribus celtiques du sud de l'Allemagne, cette petite pièce d'or incurvée a été retrouvée au printemps dernier dans un champ, à environ 70 kilomètres à l'ouest de Munich. Il s'agit d'une *Regenbogenschüsselchen*, qui signifie en allemand « petit bol d'arc-en-ciel ». Un surnom que ce type de pièces concaves a sans doute pris au Moyen Âge. Leur forme permet à la pluie de s'y accumuler et d'y refléter la lumière du soleil, les rendant plus faciles à repérer dans les champs. Selon la croyance populaire, elles tombaient des arcs-en-ciel à l'endroit où ces derniers « touchent la terre ». L'analyse menée au département numismatique de la Collection archéologique de l'État de Bavière a révélé que la monnaie était composée de 77 % d'or, 18 % d'argent et 5 % de cuivre. Surtout, cette pièce de seulement 13 millimètres de large présente un motif très rare d'étoile à quatre branches, rehaussée d'arcs ou de torques. Au Moyen Âge, chance et bonne santé étaient promises au bienheureux qui en trouvait une. **M. B.**

AKG IMAGES

À VOIR SUR LE NET

Oxford, capitale du meurtre au Moyen Âge

CRIMINOLOGIE L'Institut de criminologie de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) a publié les cartographies du projet Medieval Murder Maps, qui recense 354 meurtres connus perpétrés à Londres, York et Oxford durant le Bas Moyen Âge (du XII^e^ au XVI^e^ siècle). L'enquête révèle que le taux de meurtre par habitant était quatre à cinq fois plus élevé à Oxford que dans les deux autres villes. **A.-S. T.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

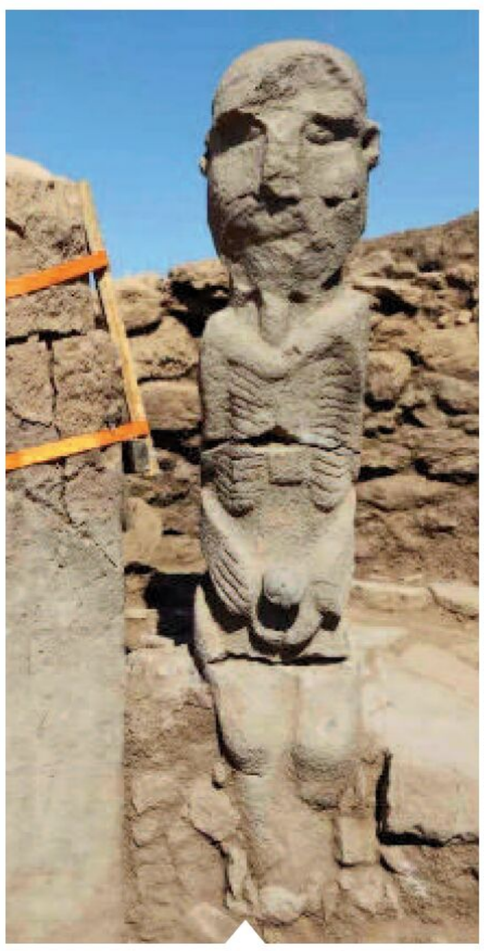
De l'ARN pour faire revivre le tigre de Tasmanie

GÉNÉTIQUE Une équipe est parvenue à extraire et séquencer des molécules d'ARN appartenant à une espèce éteinte : le tigre de Tasmanie. Les brins d'ARN — qui traduisent en protéines l'information portée par l'ADN — ont été récupérés sur le dernier spécimen connu, conservé depuis 1936 au Musée national d'histoire naturelle à Stockholm, en Suède. Les données collectées pourraient être exploitées pour la « désextinction » de l'espèce. **A.-S. T.**

SOURCE : EMILIO MARMOL-SANCHEZ, UNIVERSITÉ DE STOCKHOLM, SUÈDE.

De remarquables statues vieilles de 10 000 ans

PRÉHISTOIRE **Sur le site mégalithique de Göbekli Tepe vieux de près de 10 000 ans avant J.-C. , le ministère turc de la Culture et du Tourisme a annoncé la découverte de plusieurs statues remarquables, dont la plus ancienne sculpture peinte connue au monde : un sanglier présentant des résidus de pigments rouge, blanc et noir. Près de là, à Karahan Tepe, une autre statue a été mise au jour, cette fois anthropomorphe. Elle se dresse sur 2,3 mètres de haut en tenant son phallus à deux mains, suggérant un possible culte à la fertilité masculine.** **M. B.**



THE MINISTRY OF CULTURE AND TOURISM, TURKEY

Trouvée en Turquie, cette statue mesure 2,3 m de haut.

230 millions d'années

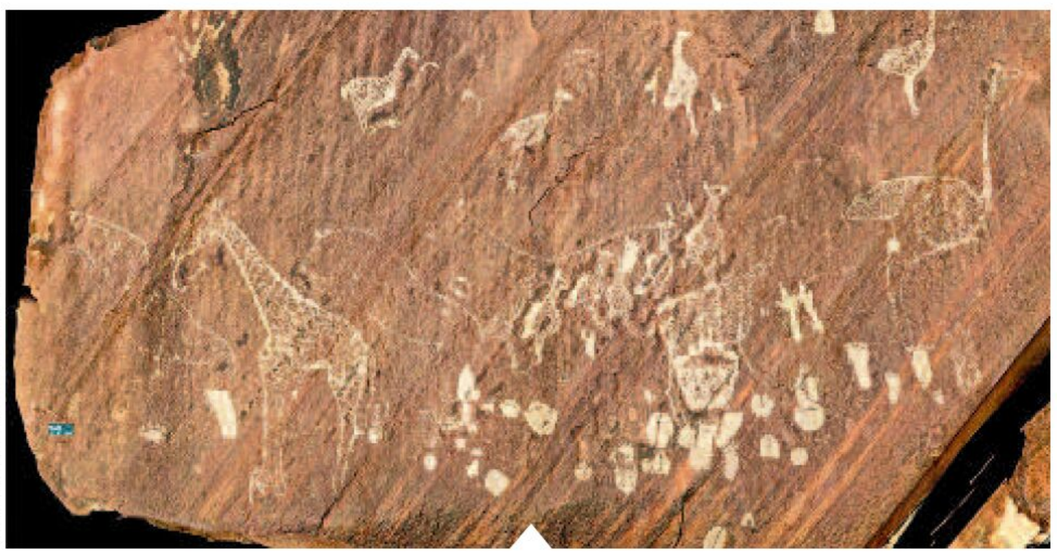
L'âge du crocodile

ÉVOLUTION Les origines des pseudosuchiens, la famille de reptiles à laquelle appartiennent les crocodiles contemporains, remontent au trias (il y a 250 à 200 millions d'années), montrent de nouvelles analyses d'os fossiles. Malgré un métabolisme lent, ils ont résisté à plusieurs extinctions massives, dont celle qui a éradiqué les dinosaures non aviaires il y a 66 millions d'années. **P. K.**

Des gravures préhistoriques en Namibie

ARCHÉOLOGIE Des centaines de gravures réalisées par des chasseurs-cueilleurs africains entre 5000 et 1000 avant notre ère ont été découvertes dans les monts Doro Nawas, en Namibie. Outre des formes humaines, elles figurent une quarantaine d'espèces animales différentes, souvent avec les empreintes correspondantes. Il s'agit en majorité de girafes, d'antilopes, de rhinocéros et d'autruches. **H. J.**

SOURCE : TILMAN LENSSEN-ERZ, INSTITUT HEINRICH-BARTH, ALLEMAGNE.



ANDREAS PASTOORS, CC-BY 4.0

Des représentations de girafes et d'autruches ont été gravées dans la roche par des chasseurs-cueilleurs dans les monts Doro Nawas (Namibie).

Un dialecte inconnu identifié en Turquie

PALÉOLINGUISTIQUE Des chercheurs de l'université de Würzburg (Allemagne) ont identifié une langue encore inconnue sur l'une des 30 000 tablettes mises au jour à Boğazköy-Hattuša (Turquie), site de l'ancienne capitale de l'empire hittite, grande puissance de la Méditerranée orientale à la fin de l'âge du bronze (1650–1200 avant notre ère). Cette « langue de Kalašma » indo-européenne serait un dialecte anatolien que les linguistes peinent encore à déchiffrer. **S. de L.**

Reconstitution d'un collier mortuaire d'enfant

ARCHÉOLOGIE C'est orné de ce somptueux collier qu'un enfant d'environ 8 ans a été enterré il y a près de 10 000 ans sous une habitation du néolithique. Les chercheurs qui en avaient mis au jour les différents éléments en 2018 sur le site de Ba'ja, à 14 kilomètres au nord de Pétra en Jordanie, sont parvenus à reconstituer le bijou composé de plus de 2500 coquilles marines et pierres colorées. **H. J.**

SOURCE : HALA ALARASHI, UNIVERSITÉ CÔTE-D'AZUR, FRANCE.

A. BURKHARDT, ALARASHI ET AL

Le bijou, mis au jour à Ba'ja (Jordanie) est fait de coquilles marines et de pierres.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

PALÉOANTHROPOLOGIE

Les humains peuplaient déjà l'Amérique il y a 23 000 ans

Avant même le dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, l'Amérique était déjà peuplée. La datation des plus anciennes traces de pas connues du continent a été confirmée, sans contestation possible. À lire sur le site de *La Recherche.* https://bit.ly/921foot

PODCAST

Sixième science, nos enquêtes en audio

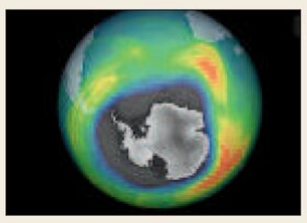
Découvrez les grandes enquêtes de la rédaction avec le podcast Sixième Science, le programme de vulgarisation scientifique réalisé tous les mois par *20 Minutes* et *Sciences et Avenir*. sciav.fr/921podcast

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

La couche d'ozone s'ouvre en grand



Atteignant plus de 26 millions de kilomètres carrés, le trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique est l'un des plus grands jamais observés.
sciav.fr/921ozone

5 minutes

Le golf du lac aux requins

Une étude tente de lever le mystère de ces requins bouledogues qui ont longtemps vécu dans le bassin d'eau peu salée du club de golf de Carbrook, en Australie.
sciav.fr/921requins

10 minutes

Un petit réacteur nucléaire français

Entretien exclusif avec Jean-Luc Alexandre, P-DG de Naarea, qui a développé le premier petit réacteur nucléaire (SMR) fonctionnant à partir de combustibles usagés.
sciav.fr/921nucleaire

AP/SIPA - L - COPERNICUS SENTINEL DATA - SCOTT WAGSTAFF - NAAREA

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

LESLEY ANDERSON, US ANTARCTIC PROGRAM & IODP JRSO

Les carottes de 7 cm de diamètre contenant les précieux échantillons du manteau terrestre ont été recueillies au milieu de l'Atlantique Nord à plus de 1000 m sous le plancher océanique. Mises bout à bout, elles atteignent une longueur record de 1267 mètres.

Terre

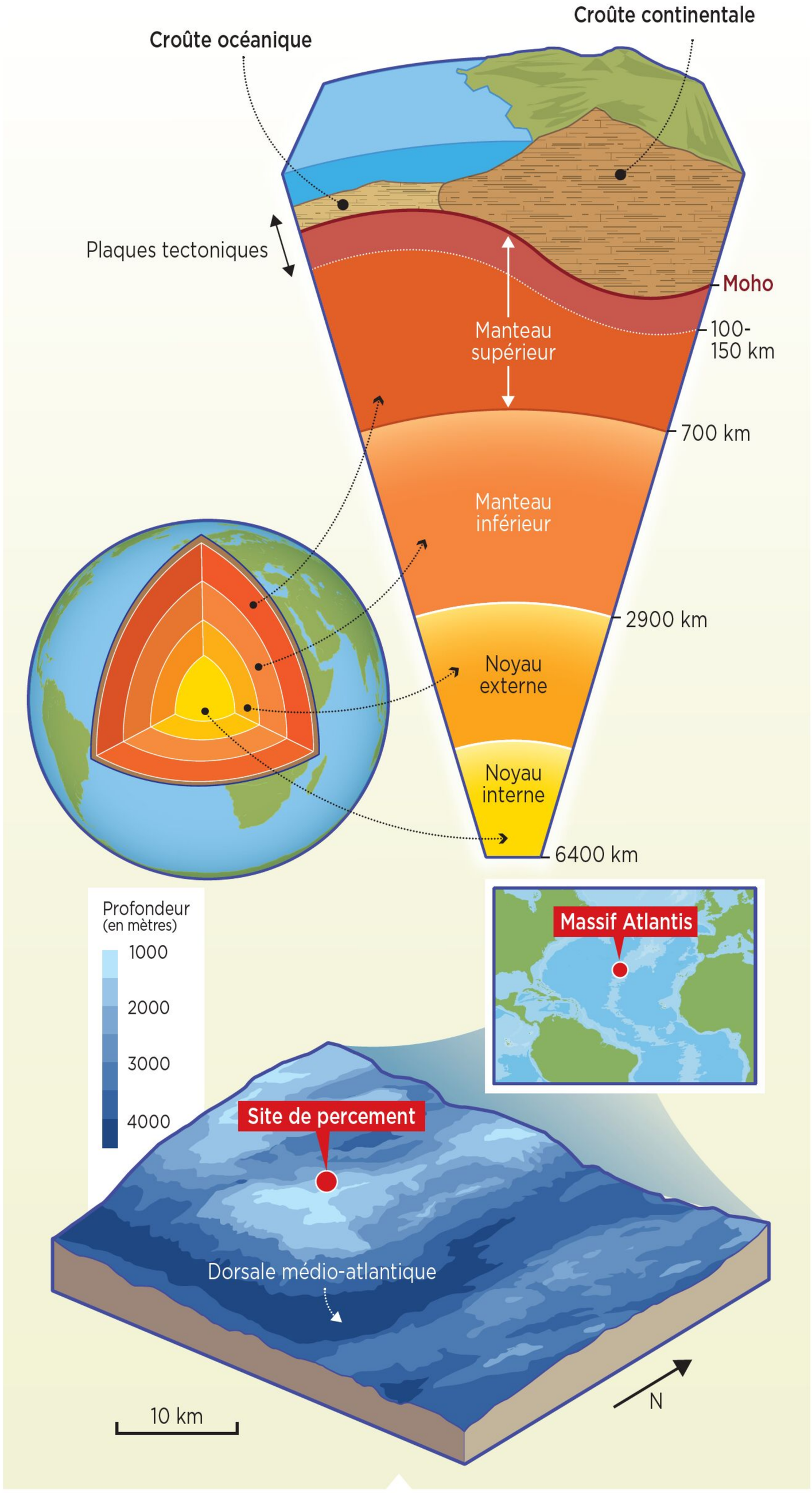
Première plongée dans le manteau

Une expédition scientifique a recueilli des tonnes d'échantillons du manteau terrestre à une profondeur de plus de 1000 mètres sous le plancher océanique. À la clé : une meilleure compréhension de la tectonique des plaques, des phénomènes magmatiques, et une estimation plus fine de la quantité d'eau souterraine.

Par Franck Daninos

L'analyse du « butin » — 30 tonnes de roches de couleur gris vert et noire — n'a pas encore commencé. Il fait l'objet, pour le moment, d'un long et minutieux travail d'inventaire à l'université A&M du Texas (États-Unis) ainsi qu'au laboratoire Géosciences Montpellier. Lorsque celui-ci sera terminé, en avril 2024, une équipe internationale de chercheurs commencera alors une batterie d'examens visant à percer certains des secrets les mieux gardés de notre planète. Car ces roches proviennent du manteau de la Terre, couche de 2900 kilomètres d'épaisseur située entre sa croûte superficielle et son noyau en fusion, qui alimente notamment les éruptions volcaniques. Elles ont été recueillies par le navire de forage *Joides Resolution* au beau milieu de l'Atlantique Nord, entre avril et juin, en creusant un puits de 1267 mètres de profondeur sous 800 mètres d'eau. *« Les carottes que nous avons récupérées sont extrêmement précieuses, uniques. C'est la première fois que des échantillons du manteau sont collectés sans discontinuité sur une telle profondeur. Nous attendions cela depuis des décennies »*, jubile Marguerite Godard, géochimiste au laboratoire Géosciences Montpellier qui faisait partie de l'expédition.

Les scientifiques ont certes déjà analysé quantité de fragments issus des entrailles de la Terre. Occasionnellement, les volcans arrachent en effet des morceaux de péridotite — la roche majoritaire du manteau supérieur (jusqu'à 670 km de profondeur) composée principalement d'olivine vert-



BRUNO BOURGEOIS

C'est au sommet d'une montagne sous-marine, le massif Atlantis, qu'un puits de 1267 mètres (appelé « U1601C ») a pu être creusé. Les carottes récupérées fourniront des informations inédites sur le manteau supérieur, une couche de 670 km d'épaisseur dont la partie la plus rigide constitue avec la croûte les plaques tectoniques.

jaune et de pyroxènes vert bouteille —, enclavés dans du magma. Des nodules pouvant mesurer quelques dizaines de centimètres, que les géologues appellent « xénolithes », émergent ainsi lors de certaines éruptions. On trouve aussi de larges portions du manteau dans les Alpes franco-italiennes, l'Himalaya ou la péninsule Arabique. Dénommées ophiolites, elles résultent de l'affrontement des plaques tectoniques, constituées elles-mêmes de la croûte et de la partie la plus rigide du manteau supérieur. Cette dernière affleure par conséquent en surface lorsque les plaques se chevauchent dans des massifs montagneux. « *Tous ces spécimens ont été cependant altérés au cours de leur histoire, leur voyage depuis l'intérieur de la Terre, subissant diverses modifications chimiques puis l'érosion* », explique Benoît Ildefonse, directeur du laboratoire Géosciences Montpellier. Ils ne sont donc pas pleinement représentatifs des conditions régnant dans le manteau supérieur — en particulier l'abondance d'éléments volatils comme le carbone ou les molécules d'eau séquestrées dans les tréfonds de la Terre.

Découvrir la composition et la structure du manteau

Les géologues rêvent ainsi, depuis des dizaines d'années, de mettre la main sur des échantillons frais du manteau : à la fois de grande qualité et à des niveaux de profondeurs importants, pour savoir ce qu'il recèle exactement et comment il est structuré. « *Cette vérité du terrain permettrait de répondre à une foule de questions critiques* », souligne Benoît Ildefonse. S'ils connaissaient les concentrations exactes de carbone dans les roches du manteau, les scientifiques auraient « *une vision plus juste de son cycle global à l'échelle de la planète,* indique Satish Singh, de l'Institut de physique du globe de Paris. *Et ce faisant, une meilleure compréhension du réchauffement climatique actuel dû aux émissions humaines de dioxyde de carbone.* » *Idem* pour l'eau mantellique, dont les quantités équi-

vaudraient de deux à dix fois celles des océans. Une estimation plus fine permettrait de mieux modéliser le mouvement des plaques tectoniques pour lequel les roches hydratées servent de lubrifiant, un phénomène qui engendre lui-même des séismes et éruptions volcaniques. Faute de données, la manière dont le manteau évacue la chaleur interne de la Terre et engendre du magma reste par ailleurs mal comprise. Tout comme la mystérieuse frontière qui sépare la croûte du manteau, dénommée « discontinuité de Mohorovicic » ou plus simplement Moho. Seules des méthodes indirectes comme l'analyse des ondes sismiques ont permis jusqu'à présent de l'appréhender. *« Mais on ne connaît ni son rôle ni sa véritable nature : bien délimitée, sur quelques dizaines de mètres seulement, ou beaucoup plus continue sur des kilomètres d'épaisseur »*, relève Satish Singh. Les premières tentatives visant à traverser le Moho et récupérer des échantillons du manteau supérieur remontent au début des années 1960. Elles furent réalisées dans l'océan Pacifique, *« les mesures sismiques ayant démontré que la croûte ne faisait que 6 à 7 km d'épaisseur sous les océans contre 35 km en moyenne sur les continents »*, détaille Satish Singh. En 1961, un groupe de géologues américains embarqua ainsi à bord du CUSS 1 — l'un des premiers navires de forage développé initialement par l'industrie pétrolière — pour creuser des puits au large de l'île Guadalupe (Mexique) sous 3600 mètres d'eau. Ils expérimentèrent notamment le « positionnement dynamique », technique permettant de stabiliser très précisément un bateau à la verticale d'un puits grâce à un système de balises et de moteurs auxiliaires.

Mais en dépit de *« formidables innovations et plusieurs succès opérationnels, les résultats scientifiques sont très loin des espérances de l'époque »*, rappelle Benoît Ildefonse. Après cinq ans de travaux et un coût de plus de 50 millions de dollars, le projet MoHole est arrêté, ne dépassant pas 183 mètres de profondeur et recueillant uniquement des sédiments et quelques dizaines de mètres de basaltes. *« Le défi technologique apparaissait immense, sans parler du coût financier »*, pose le géologue montpelliérain. À ce jour, le puits le plus profond dans la croûte océanique atteint ainsi 2111 mètres, donc encore très loin du Moho. Il a été foré entre 1979 et 1993 dans le Pacifique oriental par le *Joides Resolution*, navire surmonté d'un derrick de 60 mètres de haut servant d'abord à la prospection pétrolière avant d'être utilisé pour la recherche océanographique. Pas moins de sept expéditions auront été nécessaires pour rallier cette profondeur sous 3457 mètres d'eau. Lors de la dernière, le train de tige et la tête de forage n'avaient de cesse, l'un de se bloquer, l'autre de se casser.

THOMAS RONGE, IODP JRSO

Le navire de forage « Joides Resolution », long de 143 m et surmonté d'un derrick de 60 m de haut, était à l'origine destiné à la prospection pétrolière.

FORAGE

Un record de profondeur sans lendemain

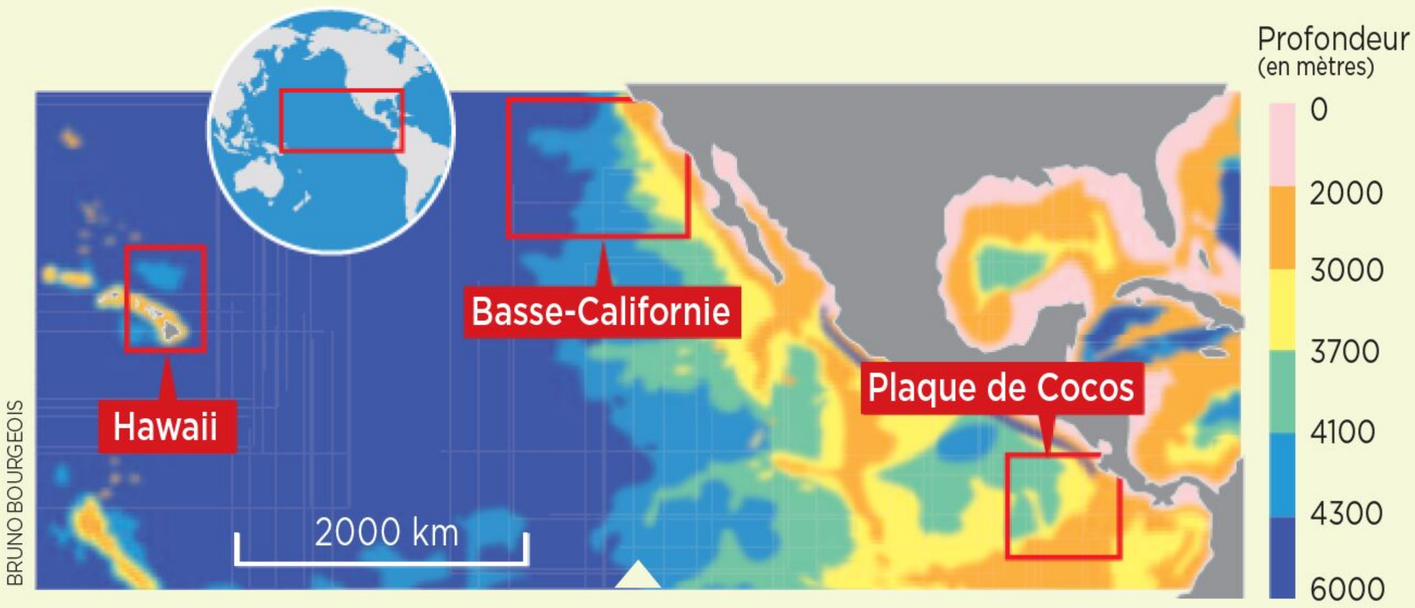
12 262 mètres : tel est le record du puits le plus profond au monde, en longueur verticale, foré sur la croûte continentale dans la péninsule de Kola, en Scandinavie. Noté « SG3 », ce forage a été réalisé par l'URSS, qui voulait ajouter cet exploit technologique à son palmarès durant la guerre froide. Commencées en 1970, les opérations ont été suspendues en 1994, faute de financements après la chute du régime soviétique. Les difficultés techniques devenaient en outre insurmontables, à la fois pour remonter les matériaux excavés et en raison des très fortes pressions et températures (180 °C). Les objectifs étaient certes davantage symboliques que scientifiques, la croûte étant très épaisse (une cinquantaine de kilomètres) et géologiquement peu active dans cette région.

Cap vers le massif Atlantis, de la taille du mont Blanc

Au printemps dernier, quand le *Joides Resolution* quitte l'archipel des Açores pour l'expédition 399 du programme IODP (International Ocean Discovery Program), l'objectif ne consiste pas à battre un quelconque record. Il met alors le cap vers le massif Atlantis, montagne sous-marine d'une taille similaire au mont Blanc *(voir l'infographie p. 32)*. *« Ce relief se situe au niveau de la dorsale médio-atlantique, zone où*

FORAGES

À la poursuite du Moho



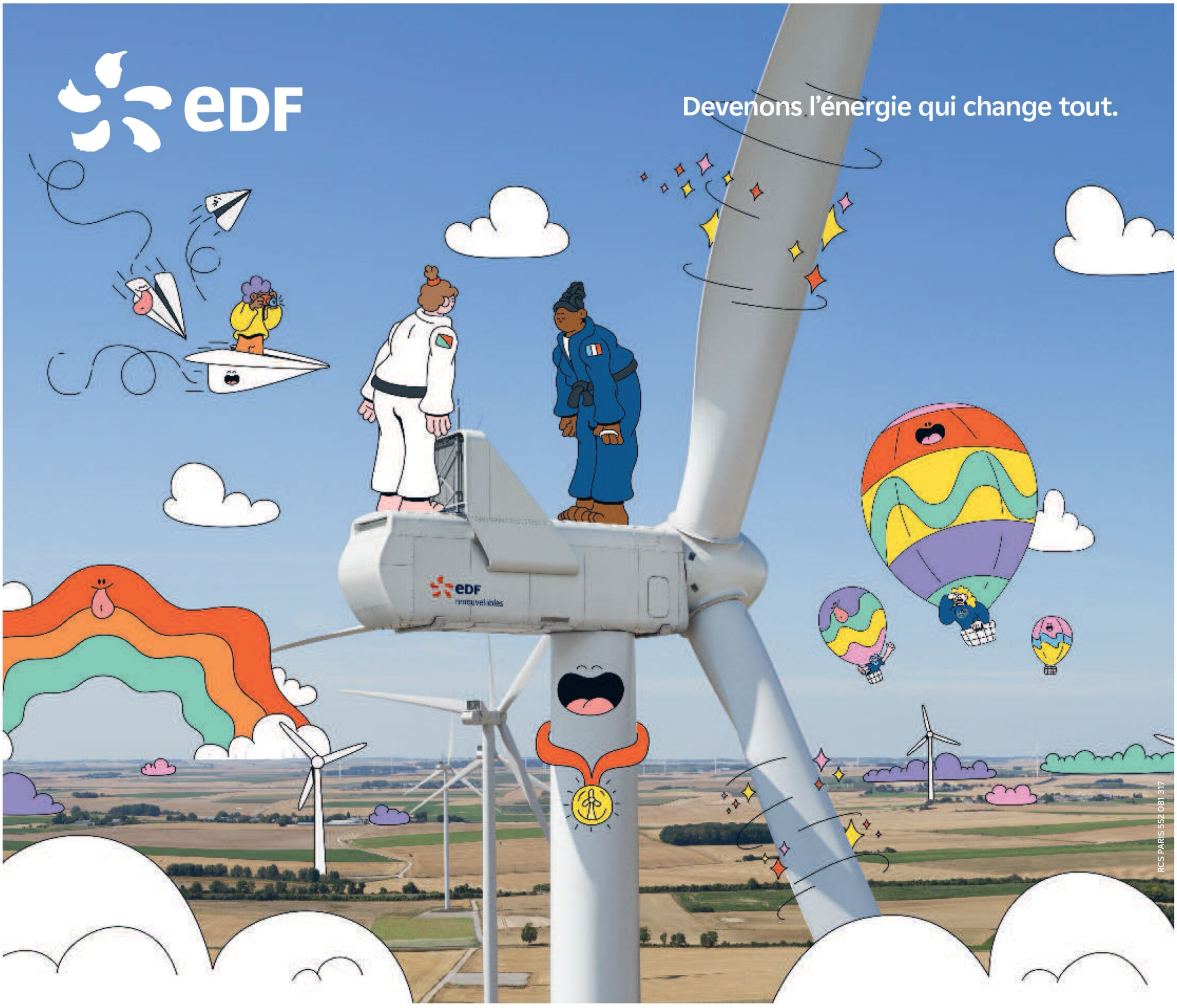
Ces trois sites, tous dans le Pacifique, sont actuellement les meilleurs candidats pour atteindre la frontière entre la croûte et le manteau.

Soixante ans après les premières tentatives, cette quête reste inachevée : percer l'écorce terrestre jusqu'à atteindre le manteau, afin de dévoiler la structure d'une zone frontière dénommée Moho. Les géologues se focalisent depuis une dizaine d'années sur trois sites candidats. Tous dans le Pacifique où une croûte homogène et continue ne s'étend « que » sur 6 km d'épaisseur : au nord d'Hawaii, au large du Costa Rica et dans l'ouest du Mexique. Ils ont été choisis sur plusieurs critères. « *La tranche d'eau ne doit pas être trop profonde, pas plus de 3000 m idéalement,* note le sismologue Satish Singh. *Et la croûte océanique âgée d'au moins 15 millions d'années, afin que la température au Moho ne dépasse pas 250 °C.* » Elle ne doit pas être trop vieille non plus, pour éviter de trop grandes couches de sédiments. « *Des mesures sismiques très pointues devraient permettre d'affiner ce choix* », espère-t-il. Mais il faudra développer aussi de nouvelles technologies pour que les têtes de forage fonctionnent à très haute température. « *La gageure principale reste néanmoins la durée des opérations et donc leur coût* », relève le géologue Benoît Ildefonse. Atteindre le Moho pourrait prendre en effet de nombreuses années et coûter près d'un milliard d'euros !

▸ *les plaques nord-américaine et eurasiatique s'écartent de quelques centimètres par an en faisant remonter les roches du manteau* », expose Marguerite Godard. Il n'y a ainsi plus besoin d'aller au-delà du Moho pour récupérer les roches du manteau. Par ailleurs, près du sommet, se trouve un réseau de cheminées hydrothermales où des réactions dites de serpentinisation entre les péridotites et l'eau de mer produisent de grandes quantités d'hydrogène. Or, ces dernières constituent une source d'énergie pour une variété de micro-organismes primitifs (bactéries, archées) qui auraient évolué sur Terre il y a plusieurs milliards d'années. « *En forant à proximité de ce champ hydrothermal, nous voulions ainsi mieux comprendre les fluides qui y circulent tout comme la biosphère profonde ayant participé peut-être à l'origine du vivant* », rapporte Marguerite Godard. Mais alors que ce type de forage, au niveau du manteau serpentinisé, n'avait jamais pu dépasser 200 mètres de profondeur, celui-ci progresse de façon inédite et inattendue. Sans rencontrer de difficultés opérationnelles ni d'obstacles majeurs, comme des zones de rupture qui sont l'ennemi du foreur en rendant les puits instables ou en brisant les trépans. « *À certains moments, nous récupérions sur le pont jusqu'à 4 mètres de carottes toutes les cinq heures ! Nous n'avions pratiquement plus de tubes pour les stocker à la fin de l'expédition,* raconte Marguerite Godard. *C'est grâce au savoir-faire inégalé des techniciens du* Joides Resolution, *mais nous avons sans doute eu aussi énormément de chance.* »

Une sorte de cordon ombilical avec le manteau chaud et profond

Si la couleur noire de certains échantillons indique que les péridotites ont été altérées par l'eau de mer, de longues sections sont en revanche très bien conservées. Elles constituent une sorte de cordon ombilical avec le manteau chaud et profond remonté au niveau de cette dorsale, qui permettra de mieux l'appréhender. Sous l'œil aguerri des experts et avant même des examens plus poussés, ces carottes témoignent par ailleurs d'une panoplie de phénomènes : des zones où le manteau a été déformé, fracturé, a interagi avec le magma ou s'est peu à peu refroidi. « *Soit toute la cuisine du manteau supérieur* », s'émerveille Marguerite Godard. Ce n'est pas tout. Car les indices de teneurs très importantes en hydrogène ont également été observés à des profondeurs inattendues, laissant poindre d'importantes découvertes sur le développement de la vie en milieu extrême. Il s'agit certes d'échantillons du manteau, et non du Moho, dont la structure échappe toujours aux chercheurs *(lire l'encadré ci-contre)*. Mais pour la chercheuse, ce trésor marquera « *une étape déterminante dans l'amélioration des connaissances en géologie et sur la vie microbienne profonde* », alimentant une foule de travaux pour les deux ou trois prochaines décennies. ■



Pour Paris 2024, pour tous les Français.

EDF, fournisseur officiel d'électricité renouvelable des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024.

PARIS 2024

eDF
FOURNISSEUR OFFICIEL D'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE

PARIS 2024

edf.fr/paris2024

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

Un nouveau supercontinent dans l'Univers

Cette bulle immense d'un milliard d'années-lumière de diamètre est constituée de milliers de galaxies. Baptisée Ho'oleilana, cette structure est deux fois plus grande que Laniakea, le superamas qui abrite notre galaxie.

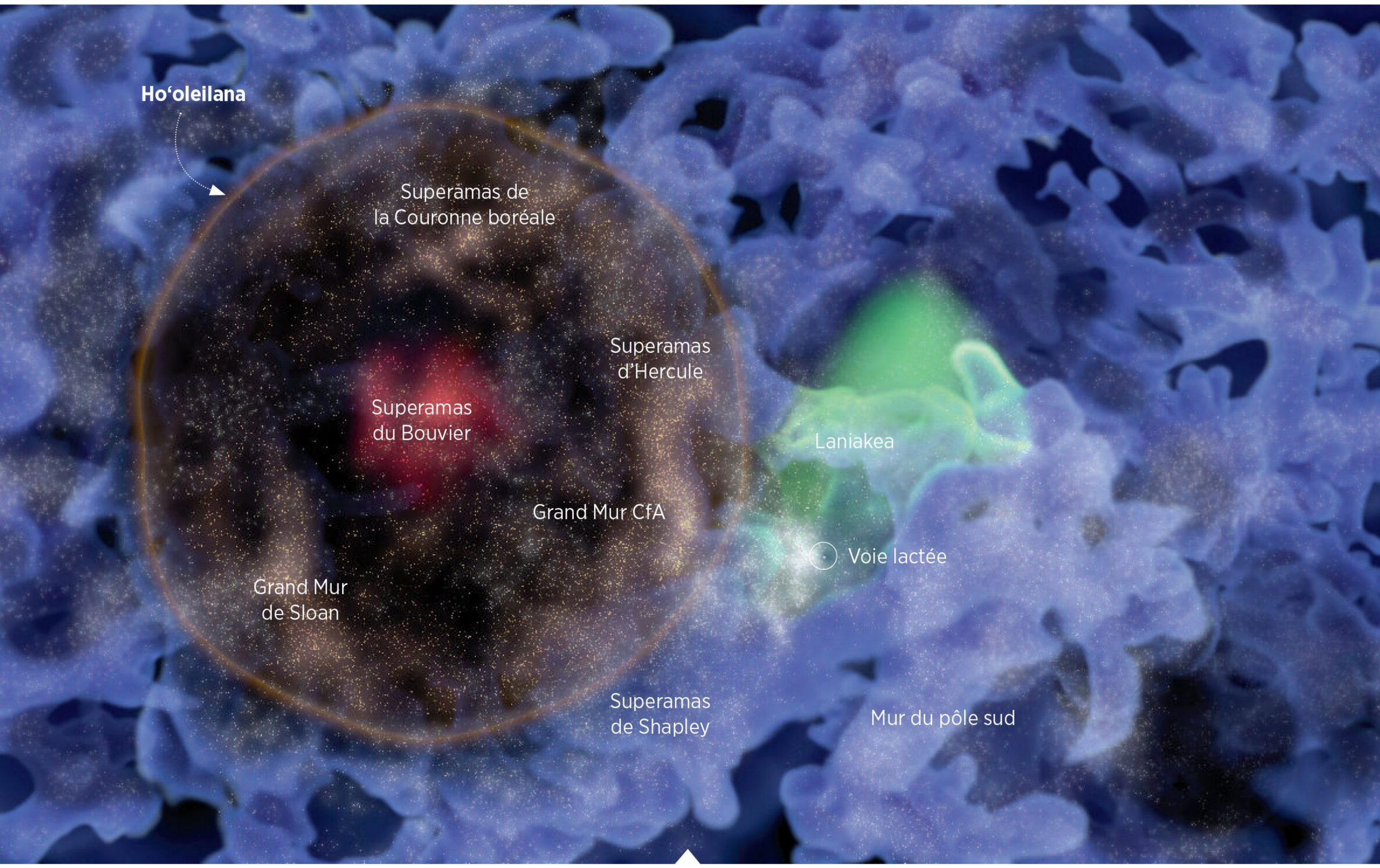
Depuis le mois de septembre, la carte de l'Univers comporte un peu moins de *terrae incognitae*. Une équipe d'astronomes dirigée par l'université d'Hawaii (États-Unis) a annoncé la découverte d'une nouvelle structure, à 820 millions d'années-lumière de nous. Il s'agit d'une bulle immense, d'un milliard d'années-lumière de diamètre, constituée de milliers de galaxies. Elle porte le doux nom de Ho'oleilana, inspiré d'un « chant de la création du monde » hawaiien. Elle vient compléter la carte globale de l'Univers, aux côtés du Grand Attracteur découvert en 1987, du Grand Mur de Sloan en 2003, du superamas Laniakea en 2014 *(lire l'encadré p. 38)*, du Mur du pôle sud en 2020… Mais Ho'oleilana les surpassent tous par sa taille, deux fois plus grande que Laniakea.

Quasiment toutes ces découvertes découlent du catalogue Cosmicflows, dont la quatrième version a été publiée en 2022. Il puise parmi les données de plusieurs instruments, des radiotélescopes aux télescopes spatiaux, afin d'établir la position et la vitesse des galaxies qui nous entourent, sur des volumes considérables. « *La toute première version de Cosmicflows, à la fin des années 2000, recensait 1700 galaxies,* explique Daniel Pomarède, de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et cartographe de Laniakea et Ho'oleilana. *Elle a permis de cartographier le Grand Attracteur et ses environs et d'estimer qu'il contient des dizaines de milliers de fois la masse de la Voie lactée. Le superamas Laniakea a été découvert parmi les 8000 galaxies de la deuxième édition. Pour la dernière édition de 2022, nous avons ajouté les données du programme SDSS* [Sloane Digital Sky Survey, relevé de galaxies commencé en 2000 à l'aide d'un télescope optique situé au Mexique]. *Nous sommes ainsi arrivés à près de 56 000 galaxies. Cet apport a ouvert une fenêtre sur une région inexplorée : le nord galactique* [qui correspond à la portion d'Univers en direction du pôle Nord terrestre]. *En réalisant la carte en 3D, nous avons mis en évidence*

CEA

« Nous faisons l'hypothèse que cette superstructure n'est pas le fruit du hasard »

Daniel Pomarède, astrophysicien à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA, à Saclay



FRÉDÉRIC DURILLON, ANIMEA STUDIO; DANIEL POMARÈDE, CEA

Cette vue d’artiste représente la carte de l’Univers à une échelle de plusieurs milliards d’années-lumière. La bulle Ho‘oleilana identifiée par les chercheurs jouxte le superamas Laniakea, découvert en 2014, où se trouve la Voie lactée.

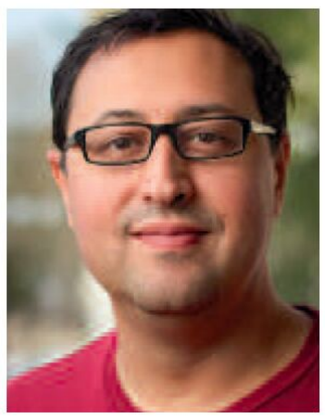
l’existence de cette sorte de coquille gigantesque tissée de galaxies, avec en son centre une concentration encore plus importante de galaxies. »

Mais cette bulle posséderait une caractéristique plus étonnante encore que sa taille… Selon un article publié dans *The Astrophysical Journal* par Daniel Pomarède, Brent Tully de l’Institut d’astronomie d’Hawaii et Cullan Holwett de l’université du Queensland (Australie), elle constituerait une trace du passé lointain de l’Univers, au plus près du Big Bang. « *Nous faisons l’hypothèse que cette superstructure n’est pas le fruit du hasard,* explique Daniel Pomarède. *Elle résulte d’une “oscillation baryonique acoustique” (OBA), un phénomène qui agitait l’Univers lorsqu’il avait moins de 380 000 ans. Nous contemplons ainsi un “fossile” de l’Univers primordial. Et cela pour la première fois depuis que l’hypothèse des OBA a été faite en 1970, par le cosmologiste américain Jim Peebles* [prix Nobel de physique en 2019]. »

La lutte entre pression et gravité à l’origine du phénomène

Les oscillations acoustiques baryoniques nous emmènent en effet moins de 380 000 ans après le Big Bang. L’Univers primordial est alors empli de plasma, un gaz ultrachaud composé de baryons (protons et neutrons), d’électrons, de photons, de matière noire… Il est opaque car les photons, qui constituent la lumière, ne peuvent se propager librement puisqu’ils interagissent sans cesse avec les particules chargées. Les oscillations acoustiques baryoniques naissent dans ce maelström, comme le décrit Karim Benabed, directeur du laboratoire Grandes structures et Univers profond à l’Institut d’astrophysique de Paris : « *Le plasma n’est pas homogène. Il existe des zones un peu plus denses où la matière noire, la matière ordinaire (les baryons) et les photons vont se concentrer. Les baryons et les photons “tombent” dans ces zones de plus grande densité. Ils s’échauffent et ont davantage*

d'interactions, comme des individus qui s'agiteraient au sein d'une foule. L'énergie libérée lors des interactions baryons-photons crée en retour une pression qui s'oppose à la gravité. Cette lutte entre pression et gravité engendre les oscillations acoustiques baryoniques, que l'on peut voir comme les cercles qui se forment dans une mare après la chute d'un caillou. À trois dimensions, cela donne une sphère qui croît à partir de la surdensité initiale correspondant à l'impact du caillou dans l'eau. »


K. BENABED

« Pour la première fois, les chercheurs ont réussi à isoler une seule oscillation »

Karim Benabed, directeur du laboratoire Grandes structures et Univers profond à l'Institut d'astrophysique de Paris

Les oscillations cessent avec la première lumière de l'Univers

Mais 380 000 ans après le Big Bang, tout change. La température du plasma passe sous le seuil qui empêchait les électrons de se lier aux protons. Des atomes d'hydrogène se forment. Le milieu devient neutre électriquement et donc transparent, car les photons peuvent se propager librement. Ainsi naît le fond diffus cosmologique, ou rayonnement fossile, la première lumière de l'Univers. « *Dans l'Univers transparent, les oscillations acoustiques baryoniques se figent car le plasma disparaît. Les surdensités amorcent une concentration de matière qui donnera finalement des galaxies, dans un Univers en expansion. Or, la répartition de ces surdensités épouse la forme de ces oscillations. C'est ainsi que va se former cette bulle, Ho'oleilana* », détaille Daniel Pomarède.

Pour faire le lien entre bulle et oscillations acoustiques baryoniques, la carte a été comparée avec des simulations numériques décrivant l'évolution de l'Univers, avec elles, puis sans. « *L'analyse statistique de la répartition des galaxies montre qu'elle correspond à l'évolution de l'Univers avec les oscillations* », constate Daniel Pomarède. Les auteurs ont également réussi à retrouver la taille caractéristique des oscillations acoustiques baryoniques. À partir de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le plasma, et connaissant la durée de propagation avant que tout soit gelé, il est en effet possible de calculer la distance parcourue par le front d'onde de l'oscillation. « *Si l'on tient compte de l'expansion de l'Univers, cette distance caractéristique est de 150 mégaparsecs* [500 millions d'années-lumière], indique Daniel Pomarède. *Ce qui correspond bien au rayon de la bulle mesurée.* »

« *C'est un joli résultat,* reconnaît Karim Benabed. *Nous avons l'habitude d'étudier les oscillations acoustiques baryoniques, mais nous le faisons sur un grand nombre car il en existait une multitude dans le plasma primordial. Si l'on compare la propagation d'une onde acoustique au cercle qui se forme autour de l'impact d'un caillou dans l'eau, ce que nous voyons habituellement c'est plutôt une foule de cercles qui se chevauchent les uns les autres. Ici, ils ont réussi à en isoler un seul, c'est très original.* » Même sentiment de la part de Christophe Yèche, cosmologiste au CEA, qui étudie également ces oscillations. « *Ce qui est nouveau dans ce travail, c'est qu'ils ont clairement identifié le centre de la bulle, qui correspond à un amas galactique, et les bords, là où tout s'est gelé, où se trouvent aussi de nombreuses galaxies. Et tout l'effort a été de montrer à 99 % que ce qu'ils ont vu n'est pas dû au hasard.* »

De nouvelles données à venir grâce à plusieurs instruments

Désormais, les arpenteurs de l'Univers attendent des données fraîches en provenance de plusieurs instruments pour continuer leur tâche. Comme Desi (Dark Energy Spectroscopic Instrument), installé au sein de l'observatoire de Kitt Peak en Arizona (États-Unis). Il a débuté en mai 2021 une campagne de cinq ans destinée à relever la position de 40 millions de galaxies et de quasars [trous noirs supermassifs au centre d'une galaxie] repartis sur un tiers du ciel visible. Enfin, le satellite européen Euclid, lancé le 1er juillet dernier, relèvera également la position de dizaines de millions de galaxies autour de nous, mais il sera aussi capable de voir très profondément l'Univers, donc dans le temps. La structure du cosmos, dans l'espace et le temps, devrait donc continuer de se dévoiler dans les années à venir. ■

Fabrice Nicot

SUPERAMAS GALACTIQUE

Laniakea, notre adresse dans l'Univers

L'annonce de sa découverte avait valu à ses auteurs, Hélène Courtois, Brent Tully, Yehuda Hoffman et Daniel Pomarède, une bien jolie une de la revue *Nature*, le 4 septembre 2014. D'un diamètre de 500 millions d'années-lumière, ce « continent extragalactique » contient l'équivalent de 100 millions de milliards de fois la masse du Soleil. En mesurant à la fois la vitesse et la distance de ces galaxies, les scientifiques avaient pu mettre en évidence que ce continent est parcouru de véritables courants de galaxies, semblables à des cours d'eau de montagne. Parmi ces galaxies ruisselantes, la nôtre, la Voie lactée, ce qui a permis d'affirmer que Laniakea (« Horizon céleste immense » en hawaiien) était en quelque sorte notre adresse dans l'Univers.

Croisière 100% Francophone

LES JOYAUX CACHÉS DES ÎLES GRECQUES

À BORD DU MS HAMBURG
DU 23 AVRIL AU 2 MAI 2024

Avec la participation exceptionnelle de

CLAUDE SINTES*

Archéologue, conservateur en chef honoraire du Patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS

Par cette croisière nous allons revivre le périple des Grecs de Lesbos, d'Amorgos, de Santorin..., quittant leurs îles sous le patronage d'Apollon de Délos, pour fonder villes et colonies autour de la Méditerranée jusqu'à Nikaïa (Nice) qui sera notre destination finale.

En empruntant le même sillage qu'eux, en visitant certains de leurs comptoirs et les plus merveilleux vestiges qu'ils nous ont laissés, en parlant de leurs dieux, c'est toute cette migration désormais mythique qui va resurgir.

De tout cela je vous parlerai au cours de cette croisière à laquelle j'aurai le plaisir de participer !

Claude Sintès

Pour son itinéraire, la qualité des intervenants et celle des prestations proposées cette croisière est recommandée par Marc SAUGIER, créateur des :

Croisières du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR La Recherche

2 EXCURSIONS OFFERTES♦
POUR LES LECTEURS DE SCIENCES ET AVENIR

Vous retrouverez également à bord nos 3 conférenciers :

OKSANA GARIN*
Spécialiste en Histoire de l'Art, littérature, mythologie et religions

CHRISTINE DARMAGNAC*
Diplômée de l'école du Louvre, de l'Institut d'Art et d'Archéologie

CÉDRIC CABANNE*
Professeur d'histoire géographie, spécialiste en géopolitique

À partir de 2 490 € /pers. en cabine intérieure double

Pour tout renseignement, réservation et demande de brochure de **nos croisières culturelles** contactez

Plein Cap Croisières au **04 93 20 21 20**
par courriel à **info@plein-cap.com** ou sur

www.plein-cap.com

PLEIN CAP CROISIÈRES

Une Expérience de plus de 35 ans dans le Maritime

Pour recevoir le programme détaillé merci de renvoyer ce coupon à
Plein Cap Croisières - 251 route de la Colle - 06270 Villeneuve-Loubet
ou ▶

Nom : . . . . . Prénom : . . . . .

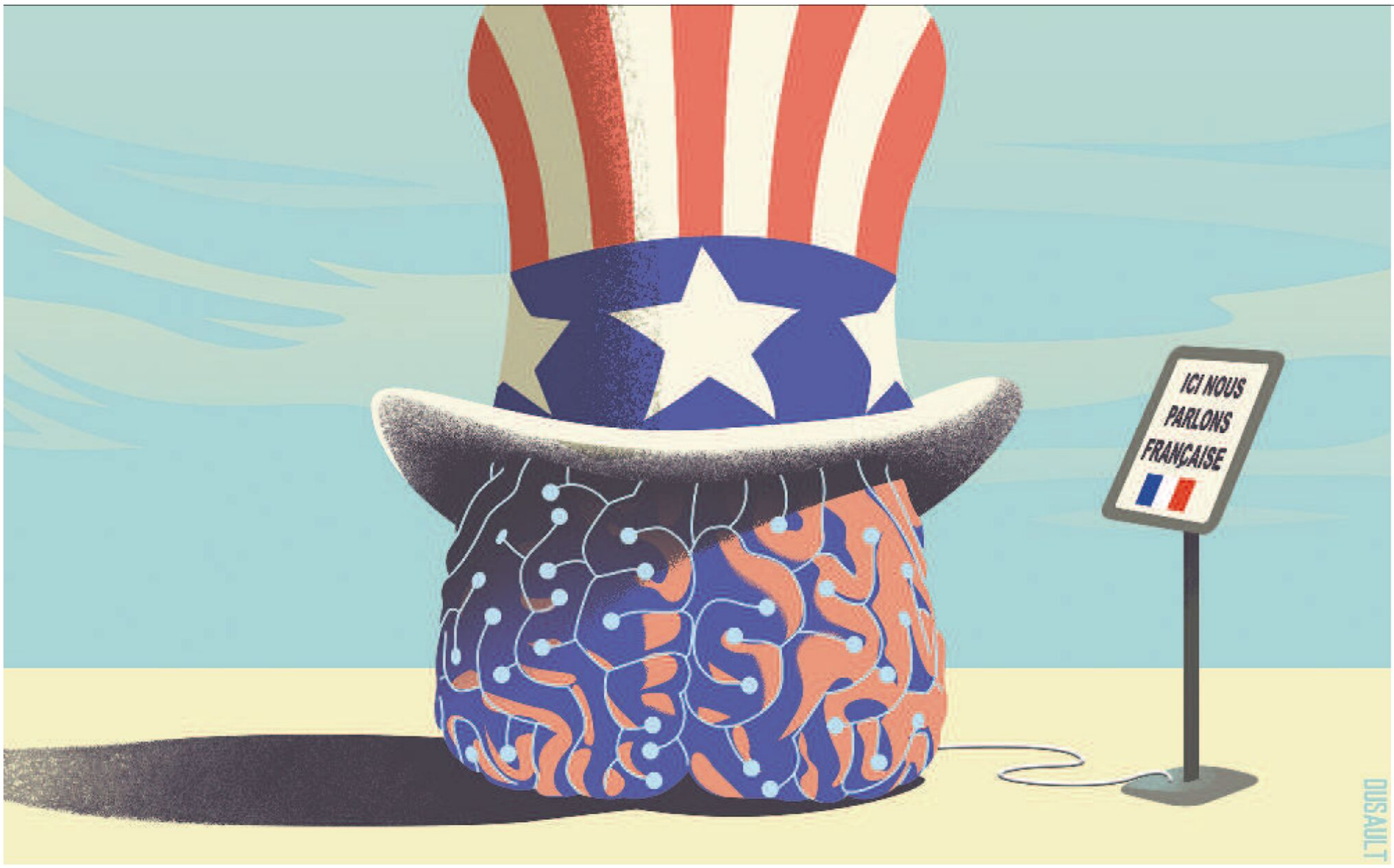
Adresse : . . . . .

Code Postal : . . . . . .Ville : . . . . .

Tél. : . . . . . Courriel : . . . . .

Conformément à la loi « Informatique et Liberté » du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre demande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. Immatriculation IM006120053. Les Conditions Générales de Vente 2024 sont disponibles sur le site www.plein-cap.com ou se reporter à la brochure «L'appel du large 2024». Les conférenciers sont non contractuels, sous réserve de disponibilité. Crédits photos : shutterstock.com/imagIN.gr photography*

♦Offre réservée aux nouveaux inscrits, non rétroactive.



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

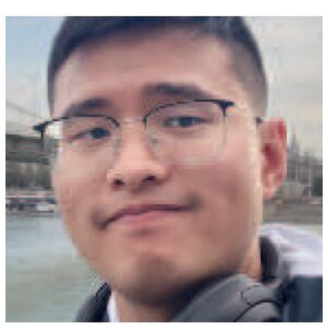
Pourquoi ChatGPT est meilleur en anglais

Les principaux robots conversationnels font leur apprentissage sur des textes en anglais. D'où une meilleure expression et plus de pertinence dans les réponses apportées dans cette langue.

« *Les langues que je peux reconnaître et dans lesquelles je peux générer du texte se comptent en centaines* », répond ChatGPT quand on l'interroge sur ses compétences linguistiques. Mais l'intelligence artificielle (IA) précise : « *Mon niveau de compétence et de précision peut varier considérablement d'une langue à l'autre.* » Et effectivement, des chercheurs de l'université du Pays basque (Espagne) ont montré que les grands modèles de langage sont plus performants quand les questions (les « prompts ») sont posées en anglais.

96 %
des données d'évaluation de ChatGPT-3 proviennent de sources anglophones.

Ils en ont évalué sept dérivés de XGLM et de LLaMa, des technologies issues du laboratoire d'intelligence artificielle de Meta (maison mère de Facebook), en les entraînant sur divers corpus multilingues comme XCopa (raisonnements logiques), PAWS-X (identification de paraphrase) ou MGSM (mathématiques). Les « prompts » étaient écrits dans chacune des langues prises en compte par chaque jeu de données. En revanche, les réponses étaient générées de deux manières : d'un côté, le modèle répondait dans la langue du « prompt », de l'autre, le « prompt » était automatiquement traduit en anglais par le modèle, qui répondait alors en anglais. Au vu des résultats comparés, le bilan est net : « *Les modèles sont bien meilleurs en anglais sur toutes les tâches,* constate Julen Etxaniz, spécialiste de traitement du langage


YONG CAO

> « L'IA ayant été entraînée sur du texte anglophone extrait d'Internet, les réponses sont bien plus alignées sur la culture américaine que sur d'autres »
> **Yong Cao,** doctorant au département d'informatique de l'université de Copenhague (Danemark)

et coauteur de l'étude. *Cela rattrape même les erreurs de traduction commises quand ces modèles passent de la langue initiale à l'anglais.* » Explication principale, selon le chercheur : ces technologies sont entraînées sur des textes majoritairement anglophones. « *Même pour les modèles les plus multilingues (XGLM et Bloom), plus de 30 % des jeux d'entraînement sont anglophones* », ajoute Julen Etxaniz.

Le Wikipédia anglophone largement utilisé

OpenAI, l'entreprise conceptrice de ChatGPT, utilise tout le Wikipédia anglophone, un énorme corpus de pages Web appelé CommonCrawl, des bases de livres numérisés, des forums en ligne. Pour le chatbot Bard (Google), 50 % des données viennent de forums, 12,5 % du Wikipédia anglophone. Mais les détails restent méconnus. « *Les rares informations fournies par les créateurs de ce type de modèle se limitent souvent à évoquer des "données récupérées sur Internet"*, note Giada Pistilli, de la société spécialiste d'intelligence artificielle The Hugging Face. *Étant donné la prédominance de la langue anglaise sur le Web, il est raisonnable de conclure que l'anglais constitue la majeure partie de leurs données d'entraînement.* » D'où à la fois une meilleure expression et plus de pertinence dans les réponses apportées dans cette langue. Mais l'entraînement n'est pas la seule explication : les tests d'évaluation jouent un rôle non négligeable. « *Ils permettent de mesurer la capacité du modèle à répondre efficacement aux différents scénarios et exigences de performance. Or, ils sont majoritairement conçus en anglais* », explique Giadai Pistilli. S'y ajoute l'apprentissage par renforcement, basé sur les évaluations d'utilisateurs testant ces modèles (pour réduire les erreurs, les biais, les contenus choquants, etc.). Ces opérations sont également faites en anglais la plupart du temps. Dans un article de 2022 décrivant ce travail appliqué à GPT- 3, OpenAI reconnaît ainsi que ces données d'évaluation sont au moins à 96 % anglophones.

POUR EN SAVOIR PLUS

L'étude de l'université de Copenhague sur le poids des représentations américaines dans ChatGPT (en anglais) : **sciav.fr/921GPT**

Un risque d'inexactitudes dans les autres langues

Et les conséquences ne se limitent pas aux performances. « *ChatGPT ayant été largement entraîné sur du texte anglophone extrait d'Internet, on observe que les réponses sont bien plus alignées sur la culture américaine que sur d'autres,* avertit Yong Cao, coauteur en juillet d'une étude sur le sujet à l'université de Copenhague (Danemark). *En clair, si on interroge le modèle sur la Chine en langue chinoise, il fournira des réponses inexactes.* » Giada Pistilli a fait le même constat il y a deux ans sur GPT-3, et souligne le risque que ces outils diffusent une vision du monde très américanisée. « *La communauté scientifique et technologique est aujourd'hui consciente de cette problématique,* assure-t-elle, *et des efforts, bien que timides, sont entrepris pour y remédier.* » ■

Arnaud Devillard

LE MOT DU MOIS

LLM (large language model)

GPT-4 (la technologie qui fait fonctionner ChatGPT), LaMDA (Bard, de Google), LLaMA (Meta) ou Bloom (technologie open source) sont ce que l'on appelle des grands modèles de langage, ou LLM (large language model). Cette notion fait référence à la quantité gigantesque de données textuelles utilisées pour leur apprentissage automatique et au nombre de paramètres du modèle, c'est-à-dire les variables qui peuvent être pondérées et ajustées pour améliorer les performances de l'algorithme. Les LLM s'appuient sur une architecture de réseaux de neurones présentée en 2017 et conçue à l'origine pour la traduction automatique, les transformeurs. Ils savent traiter des données dont le sens dépend de l'ordre dans lequel elles sont rangées. Typiquement : les mots dans une phrase. Mais l'algorithme ne traite pas ces données en suivant cet ordre et peut effectuer plusieurs traitements en parallèle, avec pour effet d'aller plus vite.

CHINE NOUVELLE/SIPA

18 millions d'hectares ont brûlé au Canada depuis le début de l'année. Un printemps chaud et sec explique le nombre record d'incendies (6400), dont les deux tiers ont été provoqués par la foudre.

Incendies

Le difficile bilan climatique

La recrudescence des feux cet été a été causée notamment par l'augmentation des températures, résultat du changement climatique. Mais si ces incendies aggravent les teneurs en CO_2 dans l'atmosphère, les chercheurs sont plus nuancés sur l'ampleur du phénomène qui reste difficile à mesurer.

Par Loïc Chauveau

Une saison en enfer. Les pompiers du Canada, de Grèce, d'Italie, se souviendront de cet été 2023 où des millions d'hectares sont partis en fumée. Au Canada, il a fallu attendre octobre pour que les incendies s'atténuent. Le bilan est dramatique et historiquement élevé. 18 millions d'hectares sont partis en fumée, surtout à l'ouest du pays, mais le Québec n'a pas été épargné. C'est comme si les 12 millions d'hectares de l'Île-de-France et ses départements limitrophes avaient été parcourus par les flammes. Au total, 6400 feux ont été répertoriés. La cause : depuis début mai, le Canada subit des conditions de chaleur et de sécheresse qui rendent les arbres et leurs litières hautement inflammables, d'autant que la forêt canadienne est principalement composée d'épicéas, des résineux très sensibles au feu. En moyenne, entre 2012 et 2021, le Canada n'avait déploré « que » 2,7 millions d'hectares brûlés.

Au regard de ces chiffres, *« le plus grand incendie jamais enregistré dans l'Union européenne »*, selon les mots d'un porte-parole de la Commission européenne, pourrait presque paraître anecdotique : d'après le système européen d'information sur les feux de forêts (Effis), 173 000 hectares ont brûlé en Grèce, principalement sur l'île de Rhodes, à Corfou et dans l'ouest et le nord-ouest de la capitale Athènes, soit 1/15e de ce qui a brûlé en Amérique du Nord. Pourtant, cela représente 1,3 % de la surface totale du pays, et environ quatre fois plus que la moyenne des surfaces incendiées entre 2006 et ▸

2022 (43 500 hectares par an). Là encore, la sécheresse affectant une végétation méditerranéenne très inflammable est le principal moteur de l'intensité remarquable des feux que les pompiers ont dû combattre.

Une sécheresse plus intense qu'avant l'ère industrielle

Le World Weather Attribution, le groupement scientifique qui étudie les relations entre les événements extrêmes et le changement climatique, a rendu son verdict le 22 août. Sans l'augmentation des températures induite par la combustion des énergies fossiles, un tel épisode aurait sept fois moins de chances d'arriver. L'intensité de la sécheresse vécue cette année dans l'ensemble de l'hémisphère Nord est 20 % plus importante qu'avant l'ère industrielle, du fait d'une hausse des températures qui est à ce jour de 1,1 °C. Mais il y a une grande différence entre les incendies du Canada et ceux de Grèce. Alors que 90 % des départs de feu sont d'origine humaine en Grèce, ce n'est le cas que d'un tiers de ceux du Canada, et encore, ces derniers sont rapidement maîtrisés et ne représentent que 4,4 % des surfaces incendiées.

Au Canada, la plupart des départs de feu sont naturels puisqu'ils démarrent principalement à partir des éclairs d'orage. Ainsi, dans une étude d'avril 2022 publiée dans *Environmental Research Letters*, une équipe internationale a montré que dans cette région septentrionale, l'assèchement des végétaux augmentait l'efficacité de la foudre à démarrer un feu. « *Avec un scénario d'émissions élevées de gaz à effet de serre, nous prédisons que les changements dans la végétation et les conditions météo favorables aux incendies augmenteront de 14 % la faculté de la foudre d'allumer un feu en Alaska et de 31 % dans les Territoires du Nord-Ouest canadien pour chaque degré supplémentaire de température d'ici à la fin du siècle* », préviennent les auteurs de cette étude. En outre, une atmosphère plus chaude augmentera le nombre d'orages, si bien qu'il faut s'attendre pour chaque degré supplémentaire des températures à un surcroît de 39 à 65 % du nombre de feux provoqués par la foudre. Il n'existe pas d'étude similaire pour la Russie qui, elle aussi, fait face à des incendies de plus en plus incontrôlables, mais il est vraisemblable que les résultats seraient les mêmes.

Les probabilités que de tels événements constatés cette année se reproduisent vont déjà s'accroître dans une atmosphère à 1,5 °C, mais cette limite, définie par l'accord de Paris, devrait être dépassée d'ici à huit ans — l'humanité est sur une pente à 2,7 °C avec les engagements actuels des États à réduire leur gaz à effet de serre. Pour le Canada et la Russie, l'enjeu est de taille : leur immense superficie forestière, le peu d'étendues d'eau où des Canadairs pourraient se ravitailler, la faible occupation humaine et l'éloignement des forces de sécurité civile y rendent difficiles la lutte contre le feu.

2 milliards de tonnes par an
de CO_2 rejetées dans l'atmosphère par les incendies.

23 %
la part des émissions provenant des incendies de la forêt boréale en 2021, contre 10 % en moyenne depuis le début du siècle.

Les énormes incendies de forêts boréales signent des différences fondamentales dans la répartition des feux à la surface de la planète, que l'on connaît de mieux en mieux grâce à la précision des satellites actuels. Première information surprenante : depuis le début du siècle, les surfaces incendiées du globe déclinent. C'est ce qu'affirme un article paru dans *Science Advances* en septembre 2021 cosigné par le chercheur chinois Bo Zheng et le Français Philippe Ciais, climatologue au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, à Saclay). Deuxième information : cette baisse cache un véritable

THIBAUD MORITZ / AFP

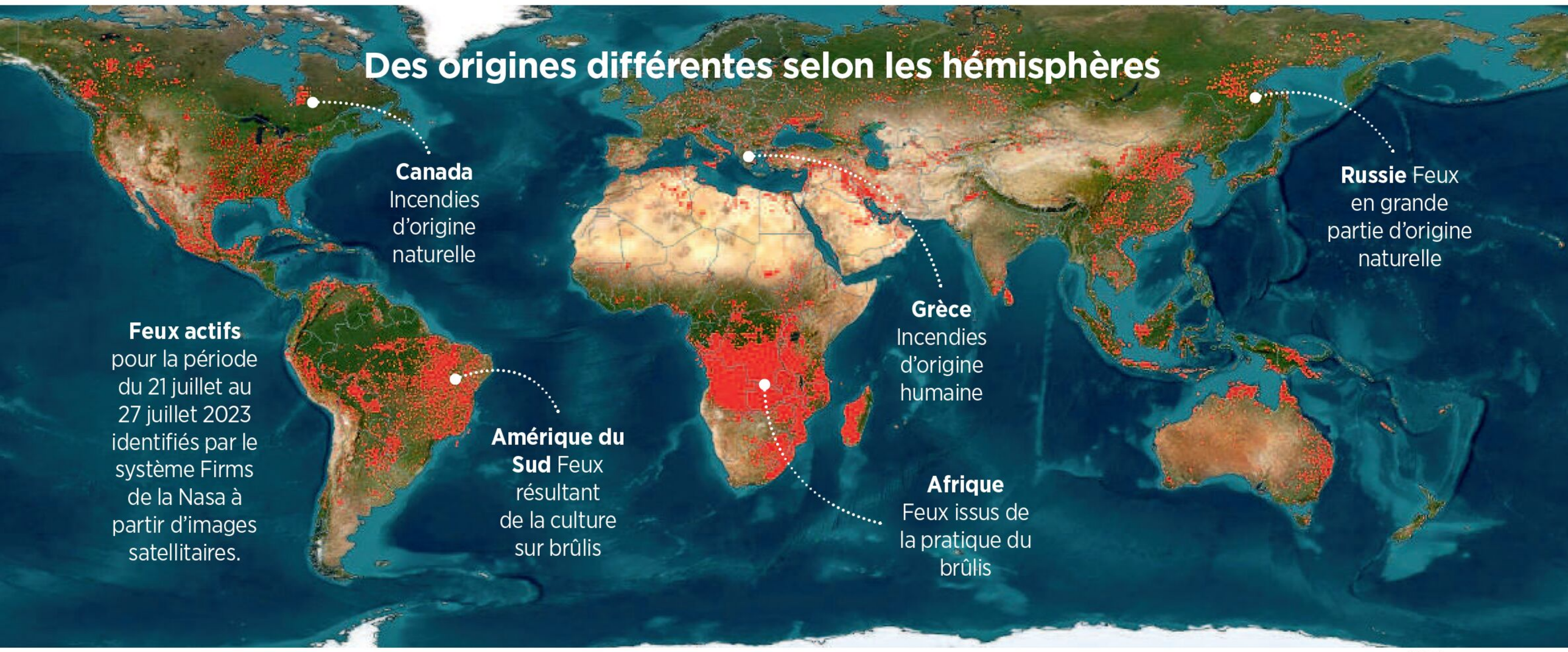
La forêt des Landes a été ravagée par un gigantesque incendie en juillet 2022.

FRANCE

Des feux toujours plus au nord

La forêt française est divisée en trois principales régions au regard de leur passé face aux incendies. La forêt méditerranéenne est celle qui est le plus souvent parcourue par les feux — tous les ans. Les forêts du Sud-Ouest connaissent des événements très espacés mais très importants. Enfin, la forêt tempérée au nord de l'Hexagone est peu concernée. En 2022 pourtant, les émissions provenant des incendies d'Aquitaine, de Bretagne, des Pays de la Loire, du Centre et du Jura ont été supérieures à celles du pourtour méditerranéen.

Cet inventaire mené par Lilian Vallet du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cefe/CNRS) révèle que 28 600 hectares de forêt



NASA

déplacement des feux. « *Nous avons globalement moins d'incendies de savane en Afrique qui représente 70 % des surfaces incendiées,* détaille Philippe Ciais. *Nous avons aussi enregistré lors de ces deux dernières décennies un recul de la déforestation en Amazonie, malgré un rebond depuis 2019 des feux souvent utilisés dans cette région.* » Pour l'Afrique, l'explication est simple : l'extension de l'agriculture et la pénétration des routes constituent autant d'obstacles pour les parcours du feu d'origine naturelle dans des zones de moins en moins inhabitées. En Amérique latine, l'instauration d'une réglementation plus sévère de l'usage des terres a également freiné l'utilisation des brûlis pour « nettoyer » les sols.

Les forêts boréales davantage touchées

Au cours de la même période, les climatologues ont à l'inverse constaté l'augmentation des sinistres dans les forêts boréales. En utilisant une méthode de détection satellitaire par infrarouge du monoxyde de carbone (CO) dont on peut déduire précisément la quantité de CO_2 produite, les chercheurs ont pu établir un redoutable phénomène. « *La forêt boréale est composée d'essences qui stockent du carbone sur le long terme, au contraire de la savane où l'herbe se renouvelle tous les ans,* précise Philippe Ciais. *Aussi, si les surfaces incendiées restent stables, le contenu en CO_2 émis augmente dans des zones où le carbone est stocké depuis bien plus longtemps.* » L'année 2021 a été ainsi exceptionnelle avec des incendies au Canada — déjà — et en Russie. Alors que les feux de forêt des régions septentrionales comptent en moyenne, depuis le début du siècle, pour 10 % des émissions mondiales liées aux incendies, cette part est passée à 23 % en 2021 selon une étude parue dans *Science* en mars, toujours sous la signature de Bo Zheng et Philippe Ciais.

Les incendies constituent donc une redoutable « rétroaction », comme n'en manque pas la machinerie climatique de la planète. Les incendies augmentent du fait du changement climatique ▶

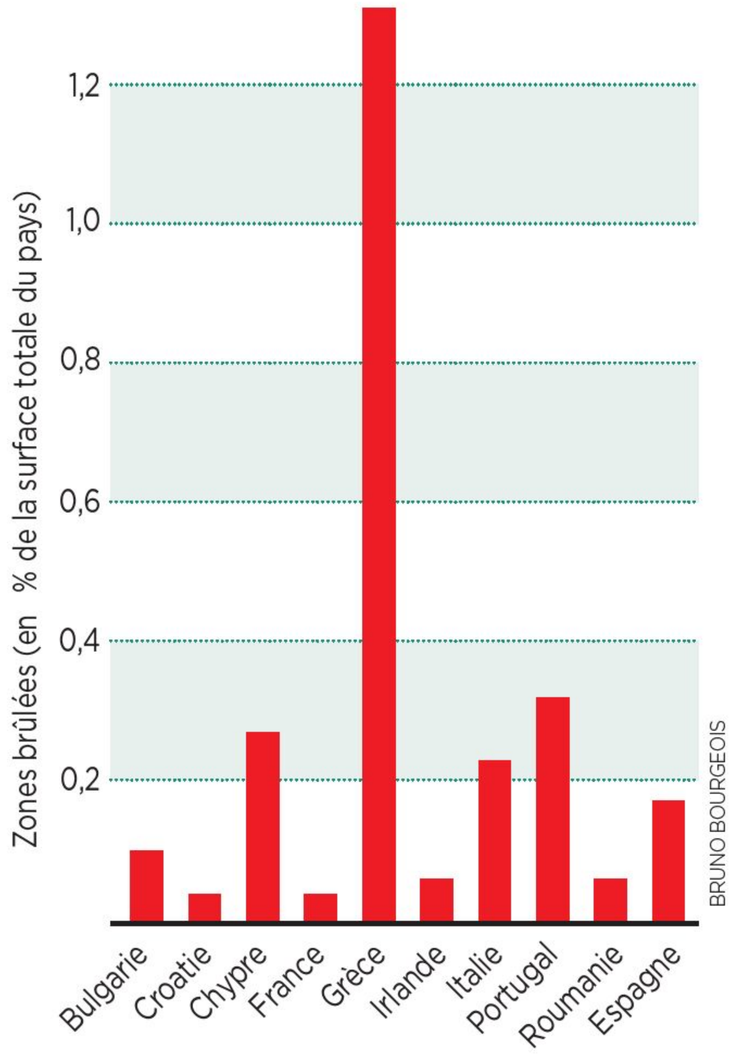
landaise sont partis en fumée, contre 494 hectares constatés en moyenne entre 2006 et 2021. De même, 3300 hectares de forêts tempérées ont brûlé, soit 15 fois plus que les 216 hectares en moyenne sur la même période. La forêt méditerranéenne a, quant à elle, perdu 10 000 hectares en 2022, soit une année semblable à celles de 2009, 2016 et 2021 et inférieure à 2017. Comment cela s'est-il traduit en émissions de CO_2 cette année-là ? Alors que la moyenne est de 300 000 tonnes, elles ont atteint 1,74 million de tonnes pour la seule forêt landaise, auxquelles il faut ajouter 570 000 tonnes pour les forêts tempérées et 250 000 tonnes pour le pourtour méditerranéen. Explication : les pins maritimes du massif landais ou les hêtres et chênes du nord de la Loire stockent beaucoup plus de carbone que les maquis et garrigues de la zone méditerranéenne.

et leurs émissions viennent s'ajouter à celles des activités humaines, aggravant les teneurs en CO_2 dans l'atmosphère. Les chercheurs estiment que 2 milliards de tonnes de carbone sont émises tous les ans par les feux de forêt, soit un tiers des 5 milliards de tonnes issues de la déforestation et du changement de l'affectation des terres, notamment la transformation de milieux naturels en zones agricoles. Ce qui représente donc une part non négligeable des 35 milliards de tonnes émises chaque année par les activités humaines.

Deux types d'adaptation pour les végétaux face aux flammes

Mais ce chiffre est à prendre avec des pincettes. « *Ainsi, nous n'intégrons pas les incendies dans notre Global Carbon Project qui fait l'état des lieux des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, tout simplement parce que nous ne maîtrisons pas le bilan global* », prévient Philippe Ciais. Il est délicat en effet d'établir un calcul solide, pour plusieurs raisons. La première, c'est qu'un incendie ne tue pas forcément tous les arbres. « *Environ 20 % des émissions globales des feux représentent une source de CO_2 que l'on peut considérer comme irréversible à une échelle de temps de la décennie au siècle, parce que ces émissions ne peuvent être compensées par la repousse de la végétation ou les pertes de carbone des sols brûlés* », estiment ainsi Bo Zheng et Philippe Ciais.

Les résineux principalement ont deux types d'adaptation pour faire face aux flammes. Morphologique pour les arbres « pyrophites ». C'est le cas du pin maritime, dont les branches sommitales (le houppier) culminent à plusieurs mètres de hauteur, les branches intermédiaires étant abandonnées au cours de la croissance de l'individu. Les flammes produites par le sous-bois n'atteignent ainsi pas le sommet de l'arbre. Adaptation reproductive pour les « pyrophiles » qui, eux, se développent au contraire en touffes (c'est le cas des cyprès ou des ifs) afin de brûler entièrement. Ils libèrent ainsi leurs graines qui vont repousser dans un lit de cendres riches en nutriments et d'où tout concurrent aura disparu.



Parmi ces dix pays européens qui ont été victimes d'incendies en 2023, la Grèce est de loin la plus touchée.

60 % des pins ont survécu dans 1000 ha brûlés en Gironde

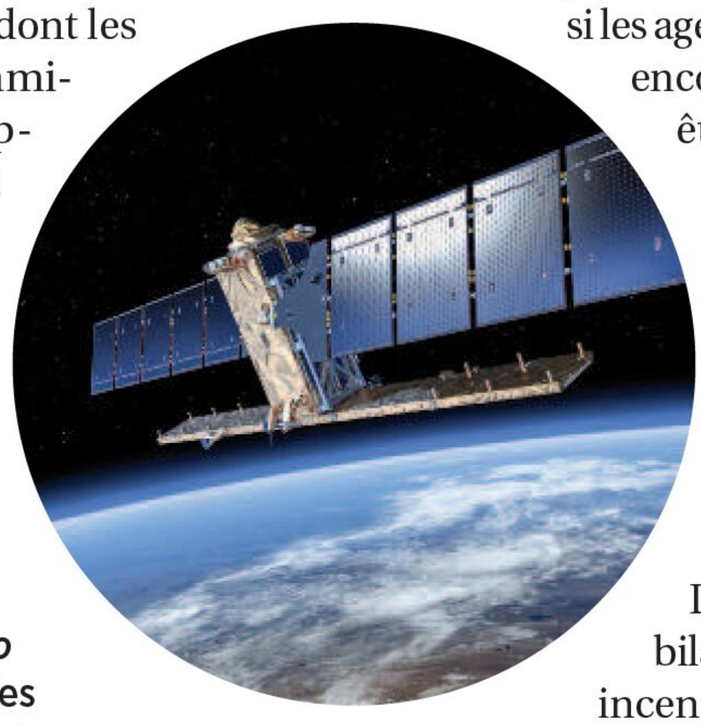
Il faut donc tenir compte du fait que les arbres pyrophites ne meurent pas nécessairement et que les rejetons des pyrophiles vont repousser très rapidement. « *Sur les 1000 hectares que nous avons perdus lors de l'incendie de La Teste-de-Buch (Gironde) en 2022, 60 % des pins sont toujours vivants et 40 % ont pu être vendus en bois d'œuvre* », témoigne Johanne Perthuisot, directrice territoriale de la région Centre-Ouest Aquitaine à l'Office national des forêts (ONF). Les pins rescapés ne peuvent être comptabilisés dans le bilan CO_2, même si les agents de l'ONF vont attendre encore quelques mois pour en être sûr car les arbres affaiblis peuvent être décimés par des ravageurs comme les scolytes. Et le carbone du bois transformé en charpentes, portes ou meubles des bâtiments est stocké, lui, pour des décennies.

Difficile donc de faire un bilan climatique définitif des incendies, d'autant que dans le cas du Canada — où les émissions totales dépasseraient le milliard de tonnes — les espaces forestiers concernés sont extrêmement vastes. Reste le constat que des températures plus élevées et des sécheresses récurrentes ont transformé les arbres des forêts boréales en de gigantesques allumettes. ■

PROGRAMME EUROPÉEN COPERNICUS

Les forêts se dévoilent mieux depuis l'espace

On connaît de mieux en mieux le couvert végétal du globe grâce aux satellites et aux survols aériens utilisant la télédétection par laser, le Lidar. Les satellites Sentinel 1 *(photo ci-contre)* et 2 du programme européen Copernicus croisent les observations optiques de l'un avec celles dans l'infrarouge de l'autre, ce qui permet un suivi mondial du couvert végétal tous les quatre à cinq jours avec une résolution de 10 mètres. En France, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) croise ces images satellitaires avec les scanners obtenus par survol aérien pour distinguer herbes, arbres, arbustes et en déduire un volume de bois vivant, avec une marge d'erreur inférieure à 2 %. Des tables de conversion éditées par le Giec permettent ensuite d'estimer les tonnes de CO_2 stockées dans les branches, les troncs, les racines et même les premiers centimètres de sol.


ESA

Écoutez

LAURENCE FERRARI ET DÉBATTEZ

18H - 19H
PUNCHLINE

Europe 1

CapaPictures / Europe 1

Quand la fausse morille détruit le cerveau

Le coupable a enfin un nom : « Gyromitra esculenta », un champignon qui ressemble à s'y méprendre à la morille. Apprécié pour sa saveur, il est à l'origine du décès de 14 personnes ayant contracté la maladie de Charcot en Savoie.

Si l'enquête fut aussi longue, c'est que l'affaire était inédite et les pistes nombreuses. Tout a commencé par un appel téléphonique en 2009. Emmeline Lagrange, neurologue au CHU de Grenoble, contacte Valérie Foucaut, médecin du village de Montchavin, en Savoie, au sujet d'un patient. Celui-ci a contracté la maladie de Charcot, aussi appelée SLA (sclérose latérale amyotrophique). À l'annonce du diagnostic, le médecin traitant tressaille : c'est le quatrième cas recensé aux alentours du village. Et ce n'était que le début. En l'espace de quelques années, 14 personnes décèdent de la maladie de Charcot à Montchavin et Bellentre, une commune voisine. À titre de comparaison, l'incidence de la SLA est de 2,7 nouveaux cas par an en moyenne pour 100 000 habitants. Face à la singularité et à l'ampleur du cluster, Emmeline Lagrange et le Pr William Camu, neurologue au CHU de Montpellier, font appel à d'autres chercheurs de renommée internationale, qui ont déjà été confrontés à de tels phénomènes.

En présentant ce cas exceptionnel lors de congrès scientifiques, l'équipe se heurte aux critiques de confrères qui invoquent alors un problème de consanguinité ou un manque d'iode. Mais Emmeline Lagrange et William Camu, qui ont étudié les facteurs environnementaux intervenant dans les maladies neurodégénératives, sont convaincus que l'origine est ailleurs. « *Bellentre étant construite près d'une mine, nous avons d'abord vérifié l'éventuelle présence de métaux dans l'eau et l'alimentation* », retrace la neurologue. S'ensuivent de multiples analyses : le bois dans les chalets, le plomb dans l'ensemble des canalisations du réseau d'eau potable, la neige artificielle, les lignes haute tension, le radon… Chaque fois qu'émerge une nouvelle hypothèse dans les lectures scientifiques, l'équipe l'éprouve sur le terrain. « *On épluche un à un des milliers de dossiers et l'on mène des centaines d'interrogatoires* », se souvient Emmeline Lagrange. Leur objectif : passer au crible les habitudes de vie des patients et des autres villageois afin

PATHOLOGIE

Qu'est-ce que la maladie de Charcot ?

La maladie de Charcot, ou SLA (sclérose latérale amyotrophique), est un syndrome incurable qui aboutit à une paralysie complète. Elle touche les motoneurones, cellules nerveuses à l'origine du mouvement. Il en existe deux types : les premiers relient le cerveau à la moelle épinière et les seconds prennent le relais jusqu'aux muscles. Leur dégradation engendre respectivement des difficultés à déglutir ou à parler — on parle d'atteinte « bulbaire » — et un déficit moteur. L'espérance de vie moyenne des patients est de trois ans après l'apparition des premiers symptômes.

JUNIORS / BIOSPHOTO

La gyromitre, ou fausse morille, est interdite à la vente en France depuis 1991. Ce champignon contient une toxine, l'hydrazine, qui affecte des cellules neuronales impliquées dans la maladie de Charcot.

d'isoler les pratiques qui sont propres aux malades. Trois facteurs distinguent alors les patients des autres personnes interrogées : le gibier, le pissenlit et le champignon. *« Nous n'avions pas de piste pour le pissenlit. Quant au gibier, nous avons testé la présence de toxines, mais en vain. Restaient les morilles qui apparaissaient dans le compte rendu des échanges »*, ajoute la chercheuse.

Une tradition ancrée dans les villages de la région

Plusieurs indices interpellent : les personnes atteintes de SLA ne cuisaient pas les champignons, ou très peu. Il faut savoir que même la morille possède une toxine non connue qui peut être très dangereuse pour certaines personnes et inoffensive pour d'autres. Dans tous les cas, il faut la cuire au moins 45 minutes, jeter l'eau de cuisson et la cuire à nouveau.

Par ailleurs, dans les échantillons de cueillette rapportés par les habitants, les experts n'identifient pas que des morilles, mais aussi de « fausses morilles », les gyromitres. Or, ce genre de champignons est interdit à la vente et à la consommation depuis 1991, car hautement toxique. Au terme de l'identification visuelle, l'équipe s'accorde sur l'espèce *Gyromitra gigas* et présume une erreur de récolte de la part des villageois. Mais en 2017, au cours d'un interrogatoire sur leur alimentation, un habitant révèle à Emmeline Lagrange et à son équipe une tradition ancrée dans ces villages : la consommation volontaire de gyromitres. *« D'après lui, il serait difficile d'y renoncer après y avoir goûté »*, rapporte la chercheuse.

La fausse morille contient une toxine : l'hydrazine, dont le mécanisme d'action est bien connu des scientifiques. Cette molécule est nocive à deux niveaux. Ingérée en grande quantité, elle peut être fatale en raison de sa toxicité hépatique et cérébrale aiguë. Mais elle s'avère tout aussi néfaste pour l'organisme quand elle est consommée de manière chronique, à petites doses. L'atteinte est alors différente : elle agit sur les processus de réparation de l'ADN. *« On pense que l'hydrazine affecte une petite partie de l'ADN appelée "O6 méthylguanine" »*. Une défaillance de cette région a un effet

EMMELINE LAGRANGE FACE AUX RISQUES

VERBATIM

EMMELINE LAGRANGE

NEUROLOGUE AU CHU DE GRENOBLE

« Le rôle de l'environnement dans les maladies neurodégénératives »

“Ce n'est pas la première fois qu'apparaît un foyer de maladies neurodégénératives. De nombreux exemples témoignent de l'imputabilité de certains aliments dans leur éclosion. Dès le début de l'enquête en Savoie, nous pensions à l'exemple très étudié de l'île de Guam. Dans les années 1960, un tiers des insulaires de cette île du Pacifique sont atteints d'une maladie mêlant les symptômes de la sclérose latérale amyotrophique (SLA) à ceux de la maladie d'Alzheimer. Quarante ans plus tard, les graines de cycas sont mises en cause. Cet exemple atteste de l'importance de l'environnement dans les maladies dégénératives. C'est la théorie de l'exposome. L'être humain évolue dans un environnement, au contact de tout ce qui le constitue : animaux, végétaux, etc., depuis sa conception *in utero*. Toute l'imprégnation hormonale (physiologique ou par les perturbateurs endocriniens), environnementale, alimentaire, mais aussi les stress, l'air respiré, les contacts avec des toxiques, le support génétique influent sur son état de santé. L'ensemble de ces expériences constitue l'exposome. Si la SLA affecte les motoneurones, ce n'est donc sans doute pas dans ces cellules qu'elle démarre. Comme pour le cancer, on pense que l'accumulation de microtraumatismes pour l'organisme conduit à l'apparition de la maladie : le corps a atteint sa limite de détoxification. Il s'agit d'une multitude de petites choses qui pourraient ne pas rendre malade s'il n'y en avait qu'une seule, mais c'est leur addition qui fait dérailler le système. Dès lors, tout ce qui endommage l'ADN peut devenir un facteur de causalité : traumatismes crâniens, tabac, exposition chronique aux pesticides, aux métaux lourds, etc.”

désastreux : tout ce qui va abîmer le neurone ne pourra plus être réparé », résume Emmeline Lagrange. C'est aussi le cas pour le cancer. L'ADN est détérioré et les processus de réparation deviennent inopérants : la maladie est amorcée. Mais ce n'est pas tout. Quand elle est consommée de manière chronique, l'hydrazine affecte directement les cellules impliquées dans la maladie de Charcot (le motoneurone central et périphérique, *lire l'encadré p. 48*). Tout semble concorder, mais un problème de taille se pose alors aux chercheurs : l'espèce de gyromitre identifiée, *Gyromitra gigas*, ne contient de l'hydrazine qu'à l'état de traces. Pas suffisamment pour être à l'origine de la maladie, sauf si la consommation est importante et régulière. À moins que ce champignon ne sécrète lui-même une autre toxine encore inconnue.

« L'identification visuelle d'un champignon est difficile. Nous avons donc effectué une récolte, que nous avons envoyée à des mycologues de l'université d'État de l'Oregon [États-Unis] *pour une analyse génétique »*, indique la neurologue. Résultat ? Il s'agit bien de gyromitres, mais contrairement à ce qui avait été évalué à l'œil, ce n'est pas la *Gyromitra gigas* mais la *Gyromitra esculenta*. *« Cela change beaucoup de choses pour les spécialistes des champignons ! »*, note Emmeline Lagrange : l'hydrazine est présente en bien plus grande quantité dans la seconde. Reste une dernière question : *« Maintenant que l'espèce est connue, nous attendons les résultats de l'analyse toxicologique pour connaître la quantité d'hydrazine que ces champignons contiennent aux alentours de Bellentre »*, explique la chercheuse. En effet, la concentration de toxine dépend de l'altitude à laquelle pousse le spécimen. Il se pourrait donc que la toxicité du champignon soit précisément exceptionnelle dans cette région. Aujourd'hui, Montchavin et ses environs ne comptent plus aucun cas de SLA, mais les fausses morilles sont encore consommées volontairement dans de nombreuses régions du globe (comme en Finlande), malgré de larges campagnes d'information.

Se méfier des applications de reconnaissance visuelle

Cette méprise sur ce champignon de printemps sert de mise en garde pour les cueillettes d'automne, car elle pointe les difficultés liées à la reconnaissance visuelle des champignons, même pour les experts. Selon l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) et son conseil scientifique — dont a été membre Emmeline Lagrange —, le nombre d'intoxications a doublé en 2023 par rapport à l'année précédente. Et les logiciels de reconnaissance visuelle ne semblent pas la solution, bien au contraire. L'agence conseille de ne pas recourir aux applications mobiles ou aux réseaux sociaux pour distinguer ce qui est consommable ou non. ■ **Marie Parra**

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

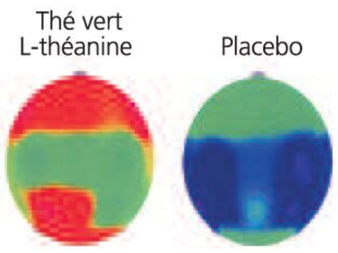
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 89 16 14 61** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

-Dre Renee Badroe, ophtalmologiste,
en formation chez Orbis International

Meta

« Avec **FundamentalVR**, je peux pratiquer des opérations virtuelles de la cataracte encore et encore dans le métavers. »

La plateforme de réalité virtuelle FundamentalVR et Orbis International utilisent le métavers pour que les chirurgiens s'entraînent à réaliser des opérations de la cataracte.
Ils peuvent ainsi s'exercer autant que nécessaire dans la VR, avant d'opérer de vrais patients.

Le métavers a déjà un impact.

EN SAVOIR PLUS
META.COM/METAVERSEIMPACT/FR

Ces aliments qui nous protègent

Êtes-vous plutôt adepte du régime Okinawa, du Mind ou de la diète méditerranéenne ? Chacune de ces assiettes compose un menu type associant les aliments les plus bénéfiques pour l'organisme. Pour prendre soin de son cœur, de son cerveau ou de ses intestins, voici les conseils des meilleurs nutritionnistes.

Dossier réalisé par
Sylvie Boistard, Cécile Coumau et Isabelle do O'Gomes

RECOMMANDATIONS
Trois régimes pour rester en bonne santé p. 56

MALADIE
Cancer : bien manger fait aussi partie du traitement p. 62

GRAND ÂGE
La dénutrition chez les seniors n'est pas une fatalité p. 65

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Trois régimes pour rester en bonne santé

Médicament ou poison, l'alimentation a des pouvoirs multiples. Ses effets sur la santé sont reconnus. Alors quel régime adopter pour réduire le risque de maladies neurologiques, cardio-vasculaires ou de cancers ? Des chercheurs nous conseillent quelques recettes.

Au cours d'une vie, nous ingérons 30 tonnes d'aliments et 50 000 litres de boissons. Pas étonnant qu'une mauvaise alimentation soit donc le principal facteur de risque de maladies. D'après une méga-étude publiée en 2019 dans *The Lancet*, 11 millions de personnes dans le monde ont succombé, en 2017, à une maladie engendrée par un régime déséquilibré. L'information a de quoi couper l'appétit ! Pourtant, comme l'a déclaré Mathilde Touvier le 11 avril lors de sa leçon inaugurale à la chaire de santé publique du Collège de France, « *les milliers d'études épidémiologiques, expérimentales et cliniques publiées ces cinquante dernières années ont permis de lever — en partie — le voile sur l'impact de ces aliments et leurs composés bioactifs sur notre santé.* » Il en ressort clairement qu'une alimentation déséquilibrée est un facteur de risque important de développer les maladies les plus répandues dans le monde industrialisé. Les mécanismes physiologiques en cause se dessinent en outre assez nettement. Anthony Fardet, chercheur en nutrition, a recensé les dérégulations métaboliques les plus citées dans la littérature scientifique comme pouvant être associées à ces maladies. Dans son livre *Manger vrai*, il cite notamment le stress oxydatif, la dérégulation du métabolisme des glucides (glycémie élevée), des lipides (taux de cholestérol élevé), l'hypertension, l'altération de la flore intestinale et l'inflammation. « *C'est une réaction normale du système immunitaire lorsqu'il est agressé. Le point de bascule, c'est quand l'inflammation devient chronique,* prévient Xavier Coumoul, toxicologue et directeur de recherche à l'Inserm. *Or, le fait de consommer des antioxydants, des oméga 3, des lipides insaturés est associé à une modération de cette inflammation. Les fruits et légumes riches en vitamines C et E ainsi que les poissons, sources d'oméga 3, captent les radicaux libres à l'origine de lésions cellulaires.* » Des régimes ayant un effet préventif ont aussi fait leurs preuves, au premier rang desquels le régime méditerranéen. Cependant, chaque individu réagit différemment, en fonction de son génome. La nutrigénétique décryptera peut-être un jour les raisons de cette variabilité. En tout cas, l'heure est à la personnalisation des conseils nutritionnels. Les instituts américains de la santé viennent de lancer leur programme Nutrition for Precision Health. Le but : mettre au point des algorithmes prédisant les réactions individuelles aux aliments. Parce que le régime alimentaire parfait et universel n'existe pas.

ÉTUDE

Comment gagner des années de vie

Une assiette riche en légumineuses, en céréales complètes, en fruits à coque, en fruits et légumes et pauvre en viande, c'est la recette de la longévité. Elle a été élaborée par des scientifiques de l'université de Bergen, en Norvège, qui ont dessiné le régime alimentaire « optimal » en matière de santé en combinant les données issues d'études internationales sur l'alimentation et l'espérance de vie. Il s'agit de la plus grande méta-étude sur le thème jamais réalisée, publiée en février 2022 dans *Plos Medicine*. Et bonne nouvelle : adopter ce mode d'alimentation à 60 ans permettrait encore de grappiller 8,8 ans pour les hommes et 8,2 pour les femmes (*lire* S. et A. *n° 904, juin 2022*).

Régime méditerranéen
Alimentation diversifiée : fruits, légumes, céréales complètes, fruits à coque, légumes secs, poissons et coquillages.

RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR

1 Préserver la santé cérébrale

Notre cerveau est friand de sucres et de gras. Après le tissu adipeux, c'est même l'organe le plus riche en lipides. Neurones, cellules gliales, synapses, ils en ont tous besoin. Or, les apports en gras et en sucres dépendent à 100 % de notre assiette. « *Une alimentation riche en fruits et légumes, et donc en antioxydants, polyphénols, peut même favoriser la neurogenèse, comme cela a été démontré sur des souris* », lance Maude Wagner, chercheuse au Rush University Medical Center (Chicago, États-Unis). Et les maladies neurodégénératives évoluant pendant des années à bas bruit, il est préférable d'adopter jeune un régime alimentaire sain. « *[Lors de ma thèse] j'ai analysé les données issues de la Nurses' Health Study, une cohorte de plus de 120 000 infirmières : les femmes avec de bonnes habitudes alimentaires à 40 ans avaient de meilleures capacités cognitives à 70 ans* », précise la chercheuse. Ces données prometteuses ont conduit le Dr Martha Clare Morris du Rush University Medical Center à créer le régime Mind (Mediterranean-Dash Intervention for Neurodegenerative Delay). Largement inspiré de la diète méditerranéenne et du Dash (Dietary Approaches to Stopping Hypertension), il se distingue par la consommation de six portions par semaine de légumes à feuilles vertes et de deux portions de petits fruits type fraises et framboises. Une étude parue en mai dans *Neurology* a montré que ce régime était associé à une moindre pathologie *post mortem* de la maladie d'Alzheimer, principalement pour ce qui concerne les agrégats de protéines bêta-amyloïdes. Cependant, un autre essai, publié en août dans la revue *New England Journal of Medicine* et incluant des personnes avec des antécédents familiaux de démence, ne mettait pas en évidence de différence entre le régime Mind et une simple restriction calorique légère. « *Le recul de trois ans n'était sans doute pas suffisant* », estime Maude Wagner. Les travaux vont se poursuivre…

À l'instar des neurologues, les psychiatres s'intéressent à notre alimentation. Des chercheurs de l'Inserm et de l'université de Montpellier ont par exemple démontré que l'adoption du régime méditerranéen — toujours lui — était associée à une diminution de 33 % d'un risque de dépression. L'alimentation anti-inflammatoire jouerait

un rôle clé dans la composition du microbiote et affecterait le lien intestin-cerveau. Quant aux aliments ultra-transformés, qui favorisent eux aussi le stress oxydatif et l'inflammation, mieux vaut les consommer à petites doses pour préserver sa santé mentale. La même équipe de chercheurs de l'Inserm a révélé en juin que les gros amateurs d'aliments ultratransformés (un tiers des apports totaux) avaient 30 % de risque supplémentaire de présenter des épisodes dépressifs, comparés à ceux dont la part des ultratransformés dans les apports quotidiens était inférieure à un cinquième.

2 Conserver la santé cardio-vasculaire

Un tiers de tabac, un tiers d'inactivité physique et un tiers d'alimentation. Les facteurs de risque évitables des maladies cardio-vasculaires sont globalement sur un pied d'égalité. Une mauvaise alimentation équivaut à environ 30 % de risques supplémentaires mais, en miroir, une alimentation saine inverse la tendance. L'étude de référence, Predimed, a en effet montré que l'adoption d'un régime méditerranéen réduit de 30 % l'incidence des événements cardio-vasculaires majeurs. Si les chiffres sont clairs, passer à l'action reste complexe. « *Il faut que la personne ressente un bénéfice au changement d'alimentation pour que ce soit durable* », reconnaît le Dr François Paillard, vice-président de la Fédération française de cardiologie. Pas simple en prévention primaire quand notre corps ne nous a pas rappelés à l'ordre. Pourtant, rééquilibrer son assiette donne des « *résultats rapides* », rassure François Paillard. De simples conseils diététiques peuvent faire baisser le cholestérol LDL de 10 à 20 %. « *On est proche de l'effet d'un médicament* », souffle le cardiologue. En quatre mois, le régime Dash permet, lui, de réduire la pression systolique de 16 points, comme l'a montré une étude publiée en 2010 dans la revue *Jama*. Cette diète mise au point en 1990 pour les hypertendus repose sur la consommation de fruits, de légumes, de céréales complètes, une réduction drastique des viandes grasses… mais il encourage aussi la consommation d'aliments riches en potassium, calcium et magnésium ainsi que la diminution du sodium.

Selon son profil et ses goûts, il est donc possible d'adapter ses menus. Régimes méditerranéen, Dash pour ceux qui ont une tendance à l'hypertension ou encore Okinawa. Ce dernier, nommé ainsi en référence à l'archipel du Japon où est recensé le plus grand nombre de centenaires dans le monde, est riche en légumes, en fruits et en poissons gras. Il se caractérise par une restriction calorique et un caractère semi-végétarien. Et le régime totalement végétarien ? « *Les données épidémiologiques montrent qu'il a un effet plutôt favorable,* déclare François Paillard, *mais les végétariens stricts qui excluent le poisson manquent d'oméga 3.* » Une étude parue en 2019 dans le *British Medical Journal* a révélé que cette exclusion faisait grimper le risque d'accident vasculaire cérébral (AVC). En nutrition, tout est toujours question d'équilibre…

Régime Okinawa
Semi-végétarien : beaucoup de légumes et de fruits, des poissons gras et un peu de viande maigre.

RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR

PRÉVENTION

Cinq aliments à privilégier

Aucun aliment à lui seul n'a jamais prouvé qu'il diminuait le risque de développer une maladie. En nutrition, tout est question de diversité. Cependant, certains aliments méritent une place de choix dans nos cuisines. En voici cinq.

SHUTTERSTOCK

Myrtilles

- Peu sucrée (7 à 10 g/100 g)
- Forte présence d'anthocyanianes, le colorant naturel des baies, qui ont une activité antioxydante.
- Privilégier les myrtilles sauvages, plus riches en anthocyanianes et en fibres.
- Les myrtilles diminuent les risques d'infarctus et de diabète de type 2 si elles sont consommées trois fois par semaine.

SIPA

Noix

- Les plus riches en acides gras insaturés (oméga 3, 6 et 9) de tous les fruits à coque.
- Bonne source de protéines maigres et rassasiantes.
- Quantités importantes de minéraux, notamment le potassium qui régule la pression artérielle.
- Recommandée pour ses vertus protectrices du système cardio-vasculaire.

SHUTTERSTOCK

Brocoli

- Très peu calorique.
- Riche en fibres, il facilite le transit.
- Source importante de vitamines C, K et B9 (acide folique). Des nutriments présents dans les brocolis réduisent l'inflammation de la peau et limitent la sévérité des allergies cutanées. Il est également associé à la prévention des cancers de l'estomac, du côlon et de la prostate.

SHUTTERSTOCK

Quinoa

- Teneur élevée en protéines et en fibres.
- Dépourvu de gluten.
- Indice glycémique très faible.
- Contenant tous les acides aminés essentiels, il est recommandé aux végétariens.

Des études suggèrent qu'il améliore la santé intestinale en agissant comme un prébiotique et qu'il réduirait le risque de développer un diabète de type 2.

SHUTTERSTOCK

Lentilles (corail)

- Légumes secs les plus riches en protéines.
- Très pauvres en lipides et un IG très bas.
- Excellente source de glucides complexes et de fibres, ce qui favorise le développement de bonnes bactéries intestinales.

Elles ont un effet rassasiant et hypocholestérolémiant, et constituent un facteur de réduction du risque de diabète de type 2.

Si aucun aliment n'a de pouvoir magique, il est tout aussi inutile d'en diaboliser d'autres. Les produits gras l'ont longtemps été, les œufs tout particulièrement pour leur teneur en cholestérol. « *La controverse n'est pas éteinte,* avoue François Paillard. *En fait, le risque que leur consommation augmente le taux de cholestérol n'existe que chez certains sujets dits répondeurs, soit 20 à 25 % de la population. Or, impossible de tester tout le monde pour savoir s'il est répondeur. Les autres peuvent en manger autant qu'ils veulent, d'autant que leur apport en acides aminés et en protéines est intéressant.* » Les produits laitiers font aussi débat en raison de leur teneur en graisses saturées. Cependant, ils contiennent d'autres lipides dits polaires qui semblent, eux, réduire le risque cardio-vasculaire. Un consortium français piloté par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) a observé qu'après un mois de consommation quotidienne de produits enrichis en lipides polaires laitiers, le taux sanguin de cholestérol LDL et de triglycérides diminuait chez des femmes ménopausées et en surpoids.

3 Prévenir les cancers

L'ADN de nos cellules est sans cesse attaqué mais il se répare. Si ce n'est pas le cas, des mutations s'accumulent, risquant de provoquer un cancer. L'alimentation peut-elle empêcher cette cascade de mutations ? En tout cas, elle joue un rôle non négligeable dans le développement de cette maladie. Le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a soupesé le poids de chaque facteur de risque et l'alimentation déséquilibrée arrive en troisième position, derrière le tabac et l'alcool. Pour autant, manger mieux est-il protecteur ? L'étude Suvimax, menée sur plus de 13 000 personnes pendant huit ans (1994-2002), ne laissait guère de doute : 31 % de risques de cancer en moins pour les amateurs de fruits et légumes. Dans l'étude, antioxydants et vitamines étaient apportés sous forme de compléments alimentaires. Restait à savoir comment une alimentation saine pouvait empêcher un « bug » cellulaire. Tout d'abord, l'effet peut être indirect. « *Par exemple, il n'existe pas de lien établi entre la consommation de sodas et le cancer,* déclare Bernard Srour, de l'équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle de l'Inserm. *Mais les boissons sucrées favorisent le surpoids et l'obésité, qui eux-mêmes favorisent le développement de certains cancers.* » En fait, l'excès de masse graisseuse entraîne la production d'une hormone de croissance, l'IGF-1, impliquée

dans la prolifération des cellules saines mais aussi cancéreuses. Le tissu adipeux est également riche en aromatase, une enzyme qui transforme les androgènes en œstrogènes, et par conséquent stimule les cellules des tissus hormonodépendants, favorisant les cancers du sein, de l'utérus et de l'ovaire. Souvent, plusieurs mécanismes se cumulent. C'est le cas des aliments ultratransformés. « *Leur profil nutritionnel — très gras et très sucré — n'explique pas tout,* déclare Bernard Srour. *La présence d'additifs, de substances qui se forment lors des procédés industriels, des matériaux au contact des aliments…, tout joue.* » Parfois, les aliments ne font pas de détour. La charcuterie et les viandes transformées sont par exemple classées comme « cancérogène certain » par le Circ. Limiter au maximum leur consommation évite d'ingérer des sels nitrités, qui favorisent l'apparition du cancer colorectal. Quant à la viande rouge, cancérogène probable, il est recommandé de ne pas dépasser les 500 g par semaine.

Mais existe-t-il des aliments vraiment protecteurs ? Oubliez le curcuma, le chou kale ou le thé vert qui n'ont rien prouvé chez l'humain. En revanche, les produits riches en fibres ont accumulé les preuves de leurs bienfaits. Réduction de la production d'insuline, baisse de la concentration d'hormones de croissance dans le sang impliquées dans la prolifération des cellules, transit accéléré réduisant l'exposition du côlon aux substances cancérogènes… Leurs pouvoirs se cumulent pour faire obstacle au cancer colorectal. Quant à l'alimentation bio, moins contaminée par les pesticides, elle jouerait aussi un rôle protecteur. Une étude française parue en 2018 dans le *Jama International Medicine* évaluait la baisse du risque de cancer à 25 % chez les plus gros consommateurs. Le résultat était significatif pour le cancer du sein et les lymphomes. Mais était-ce dû seulement au bio ou à un mode de vie plus sain ? Difficile de trancher.

T. CAMPION : AFP POUR FONDATION BETTENCOURT SCHUELLER

« Les aliments ultratransformés affectent le microbiote et altèrent la barrière intestinale »

Bernard Srour, épidémiologiste, équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle de l'Inserm

4 Se prémunir des maladies métaboliques

70 % des nouveaux cas de diabète sont liés à ce que nous mangeons. À en croire cette étude parue dans *Nature Medicine* en avril, notre alimentation porte une lourde responsabilité dans l'explosion mondiale des cas de diabète de type 2. Et les chercheurs de l'université Tufts (Somerville et Medford, États-Unis) pointent du doigt trois classes d'aliments : une consommation insuffisante de céréales complètes, une consommation excessive de riz et de blé raffinés (par opposition à complets) et de viande transformée.

Certes, d'autres mauvaises habitudes de vie font le lit du diabète, au premier rang desquelles la sédentarité. Par ailleurs, il n'existerait pas un mais quatre diabètes de type 2 différents, avec des profils de patients hétérogènes. Mais, selon l'étude publiée en 2018 dans *The Lancet Diabetes and Endocrinology*, ceux dont le diabète est en lien avec l'obésité représentent le deuxième groupe le plus important, après celui des sujets âgés. En fait, comme l'explique Anthony Fardet, c'est une sorte d'événements en cascade que « *l'on observe en général : surpoids, obésité, résistance à l'insuline, inflammation chronique, augmentation du stress oxydatif, dérégulation du métabolisme des lipides, syndrome métabolique, puis diabète.* » Un enchaînement qui peut ensuite entraîner des maladies cardio-vasculaires. Pour éviter d'arriver au stade ultime de cette chaîne, l'alimentation constitue donc un levier majeur, aussi bien sur le plan de la quantité que de la qualité. Ainsi, même si les régimes restrictifs ont

DERMATOLOGIE

La peau, reflet de notre assiette ?

Le chocolat a le dos large. Accusée d'être responsable de poussées d'acné, cette friandise n'est sans doute pas aussi dangereuse qu'on le prétend. Les études scientifiques sont en tout cas contradictoires. Quant au lait, sa consommation pourrait elle aussi être associée à la survenue d'acné. « *Ces études sont à risque de biais et ne permettent pas de conclure* », tempère la société française de dermatologie. Une étude menée à partir de la cohorte NutriNet-Santé plaide seulement en faveur d'« *une alimentation à charge glycémique normale pour prévenir l'apparition ou le maintien de l'acné à l'âge adulte* ». Quant à la carotte qui donne bon teint, ce vieil adage a été vérifié scientifiquement. Le bêtacarotène donne bonne mine, mais ce pigment est aussi présent dans les abricots, la patate douce, les épinards, le chou vert frisé… Enfin, pour lutter contre le vieillissement cutané, le régime méditerranéen ou son cousin, le régime Dash, composés d'aliments aux effets antioxydants et anti-inflammatoires, semblent les plus efficaces.

été décriés, la Haute Autorité de santé recommande pour une perte de poids durable *« une restriction calorique de 600 kilocalories (kcal) par jour ou des régimes pauvres en lipides, en combinaison avec le soutien d'un expert et un suivi intensif »*.

La qualité du régime alimentaire pèse aussi dans la balance. Car toutes les calories ne se valent pas. L'excès d'acides gras et de sucres (qui se transforment en graisses) conduit à une dérégulation des voies métaboliques. Par conséquent, l'adoption du régime méditerranéen enrichi en huile d'olive extra-vierge a fait ses preuves : l'étude Predimed a démontré qu'il réduisait de 30 % le risque de développer un diabète de type 2. Quand les fibres et les glucides complexes sont au menu avec des fruits et légumes, des légumineuses, des fruits à coque ou encore des céréales complètes, le sentiment de satiété augmente. Réduire au maximum les aliments ultratransformés s'avère également une stratégie payante. Comme l'explique Bernard Srour, une telle alimentation *« affecte le microbiote et altère la barrière intestinale. Des bactéries se retrouvent alors dans le sang et s'infiltrent dans les tissus comme le foie et les tissus adipeux, déclenchant les processus liés à l'inflammation et aux pathologies métaboliques. »*

Les produits ultratransformés seraient même les premiers responsables de l'obésité, d'après l'Enquête nationale australienne sur la nutrition et l'activité physique. Selon les auteurs de ces travaux parus en 2022 dans la revue *Obesity*, *« notre corps mange pour satisfaire un objectif en matière de protéines. Mais le problème est que les aliments des régimes occidentaux contiennent de moins en moins de protéines. Il faut donc en consommer davantage pour atteindre son objectif en matière de protéines, ce qui a pour effet d'augmenter l'apport énergétique quotidien. »*

Régime Mind

Aliments du régime méditerranéen avec plus de légumes à feuilles vertes et de petits fruits rouges (framboises, etc.).

RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR

5 Éviter les maladies intestinales

L'origine précise des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (Mici) reste floue. Un trio serait en cause : une susceptibilité génétique, une réactivité particulière du système immunitaire et des facteurs environnementaux. Parmi ces derniers, l'alimentation fait figure de coupable idéal puisque les Mici touchent l'appareil digestif. Concrètement, plusieurs études ont permis de dessiner le menu idéal. Une alimentation riche en fruits et légumes, en acides gras oméga 3 provenant des produits de la mer est associée à un risque plus faible de Mici. À l'inverse, des chercheurs de l'Inserm ont mis en place une étude cas-témoins sur plus de 366 000 participants de la cohorte Epic, pour lesquels ils disposaient de données sur les Mici. Il en ressort qu'*« un déséquilibre alimentaire avec une forte consommation de sucre et de boissons gazeuses et une faible consommation de légumes et légumineuses est associé au risque de rectocolite hémorragique. »*

Concernant la *junk food*, les preuves ne sont pas éclatantes. Certaines études trouvent une association entre alimentation ultratransformée et syndrome du côlon irritable, d'autres incriminent les émulsifiants dans le déclenchement d'inflammations intestinales. Mais selon certains résultats, ces liaisons dangereuses ne semblent pas formellement démontrées, en dépit d'une tendance d'association avec la maladie de Crohn. C'est le cas de l'étude présentée en mars lors des Journées francophones d'hépato-gastroentérologie et d'oncologie digestive. Les auteurs estiment que les personnes à risque ayant des membres de leur famille atteints de Mici devraient privilégier les aliments peu ou pas transformés. ■

C. C.

Cancer : bien manger fait aussi partie du traitement

Garder un poids stable est essentiel quand on suit un traitement anticancéreux. Mais les effets secondaires peuvent rendre les repas difficiles. Explications.

Crème de concombre, penne sauce tomate aux olives, tiramisu aux cerises… Ces recettes ne sont pas tirées d'un nouveau livre de cuisine à la mode. Elles ont été imaginées par les chefs du centre de recherche de l'institut Lyfe (ancien institut Paul-Bocuse) de Lyon, avec une petite particularité : toutes sont spécifiquement adaptées aux personnes qui suivent un traitement anticancéreux. Chacune est proposée avec trois variantes : une enrichie en arômes et épices pour rehausser l'odeur du plat ; une autre en sel, en acidité ou en sucre pour exalter les saveurs ; une dernière en matières grasses pour améliorer la texture et l'onctuosité. Ce guide de 35 recettes sur mesure s'inscrit dans le cadre du projet Canut (Cancer, nutrition & taste), qui vise à mieux comprendre les modifications de perception et de comportement alimentaires induits par la chimiothérapie et auquel collaborent une dizaine de partenaires (Hospices civils de Lyon, Centre Léon-Bérard, cancéropôle Clara, groupe Apicil, la Ligue contre le cancer, etc.). *In fine*, ce guide pourrait être diffusé dans les structures de soins anticancéreux.

Près de la moitié des patients sont dénutris

À première vue, la question alimentaire pourrait paraître secondaire au regard d'une maladie grave comme le cancer. Et pourtant, bien se nourrir fait partie intégrante du traitement. « *L'objectif est de ne perdre aucun kilo. Or, les dépenses énergétiques sont modifiées en raison des perturbations du fonctionnement des cellules et de l'inflammation induite par la tumeur. La perte de poids, principalement de la masse musculaire, peut survenir rapidement, notamment dans les jours qui suivent une chimiothérapie* », met en garde le Dr Bruno Raynard, chef de l'unité transversale de diététique et de nutrition de l'institut Gustave-Roussy à Villejuif (Val-de-Marne).

Le Dr Clémence Toullec le constate chaque jour au sein de l'unité d'oncologie digestive et ORL de l'institut du cancer Sainte-Catherine à Avignon. « *40 % des patients sont dénutris tous cancers confondus ; pour les patients souffrant d'un cancer digestif ou de la sphère ORL, c'est quasiment 100 % et pour la plupart, il s'agit d'une dénutrition sévère, caractérisée par une perte de poids de plus de 10 % en un mois* », explique l'oncologue. On parle déjà de dénutrition modérée lorsque la perte de poids représente 5 à 10 % du poids corporel dans le mois qui précède, soit par exemple 3 à 6 kg pour une personne de 60 kg. « *Ce n'est pas anodin, car la perte de la masse musculaire induit une augmentation du risque de toxicité des traitements, mais aussi une moindre capacité à les supporter* », insiste Bruno Raynard.

La dénutrition est également associée à un affaiblissement du système immunitaire, une moindre réponse aux thérapies anticancéreuses, ainsi qu'à une morbidité et une mortalité accrues. « *Il peut*

PRÉVENTION

Une assiette équilibrée contre la récidive

Il est souvent possible, dès l'arrêt des traitements, de reprendre une alimentation « normale » (hormis pour les cancers digestifs et ORL). Couplée à une activité physique régulière (au moins 30 minutes par jour), une assiette équilibrée suivant le Programme national nutrition santé PNNS (5 fruits et légumes par jour, limiter les produits ultratransformés, l'alcool et la viande rouge…) contribue à prévenir l'apparition d'un deuxième cancer et à limiter la prise de poids, facteur de risque d'une récidive.

DRAZEN/ GETTY IMAGES

Pour aider l'organisme à mieux lutter contre la maladie, l'alimentation joue un rôle clé. Les patients sont invités à manger de tout selon leurs envies (à quelques rares contre-indications près).

arriver que l'on retarde une chimiothérapie car le patient est trop affaibli, il y a une vraie perte de chances de guérison », regrette Clémence Toullec. Une alimentation artificielle peut être nécessaire, en complément ou administrée de façon exclusive, soit par intraveineuse soit grâce à une sonde placée directement à travers la paroi de l'estomac ou de l'intestin grêle.

Aiguiser l'appétit des patients sous traitement est un enjeu crucial mais aussi, dans certains cas, un défi à relever tant les effets secondaires de la radiothérapie et de la chimiothérapie peuvent bouleverser le rapport du patient à la nourriture. Sensation de bouche sèche, amertume persistante, aversion pour certains mets, hypersensibilité aux odeurs qui rend les cuissons difficiles à supporter, plaies buccales (aphtes) et mucosités, gêne à la déglutition, altérations du goût et de l'odorat sont autant de facteurs qui déprécient l'envie et le plaisir de manger. « *Certaines molécules cytotoxiques, comme le cisplatine, des sels de platine, prescrits*

CONSEILS

Comment adapter son alimentation

CONTRE LA PERTE D'APPÉTIT

- Fractionner les prises alimentaires au cours de la journée en 6 à 8 petites collations si nécessaire.
- Enrichir ses préparations en protéines et en matières grasses avec des lamelles de fromage, de feta ou de mozzarella dans une salade composée ou un plat de légumes, du fromage fondu (gruyère, cantal, etc.), de la crème fraîche ou du lait entier dans des purées et des potages.

CONTRE LES NAUSÉES

- Éviter les aliments gras, rôtis ou frits.
- Préférer des plats cuits refroidis, qui dégagent moins d'odeurs.
- Privilégier la cuisson en papillote ou au micro-ondes pour cuisiner sans odeur.

POUR MIEUX DÉGLUTIR

- Bien s'hydrater tout au long de la journée (bouillon, soupes, jus, etc.)
- Préférer la viande hachée, les légumes sous forme de purée et de flans et les fruits en smoothie.
- Cuire les fruits acides (kiwi, citron, orange) en cas d'aphtes.
- Limiter les épices fortes, noix, vinaigrette, produits salés, en prévention des aphtes.
- Pour une texture plus onctueuse, ajouter de la crème dans un potage, des purées d'oléagineux (amande, noisette) dans une purée, ou un yaourt grec dans un jus de fruit.

CONTRE LES MAUVAIS GOÛTS

- Les épices et les herbes aromatiques.
- Ajouter de la sauce béchamel ou du gruyère râpé pour masquer le goût de « fer » de la viande.

dans les cancers ORL, du poumon ou de l'ovaire sont connues pour induire un goût métallique », explique Clémence Toullec. La radiothérapie au niveau de la sphère ORL et la chimiothérapie peuvent perturber la détection des cinq goûts primaires que sont le sucré, le salé, l'acide, l'amer et l'umami. « *Les traitements peuvent aussi altérer une partie des centaines de récepteurs olfactifs qui captent les molécules odorantes et nous permettent de différencier la pêche d'un abricot ou le poisson du tofu* », complète Agnès Giboreau, directrice du centre de recherche de l'institut Lyfe.

La bonne nouvelle est que les traitements ne semblent pas modifier le bon fonctionnement du nerf trigéminal, qui, issu du cerveau, innerve toute la face et se divise en trois rameaux : nerf ophtalmique, nerf mandibulaire et nerf maxillaire. « *C'est lui qui détecte les sensations de frais, d'âcre, de piquant, le caractère brûlant du gingembre et le côté pétillant d'une boisson effervescente. On peut ainsi jouer sur les poivres, le menthol, la moutarde ou encore l'ail pour le stimuler et renforcer les saveurs en cas de déficit sensoriel comme l'odorat* », détaille Agnès Giboreau.

Adapter son assiette permet ainsi de retrouver du plaisir à table et de maintenir sa masse musculaire par la majoration de la part journalière de protéines (1,2 à 1,5 g par kg de poids corporel au lieu de 0,8 g/kg). « *En cours de traitement, il ne faut plus chercher à conférer à l'alimentation un objectif préventif mais une façon de permettre à l'organisme de mieux résister face à la maladie. Le patient a donc le droit de manger ce qui lui fait envie. Lui seul sait la quantité de nourriture qu'il a la capacité de supporter et il est important que les aidants ne fassent pas de forcing alimentaire. Cela finit par augmenter le risque de dégoût, ce qui est contreproductif* », explique Bruno Raynard. Seuls quelques aliments comme le pamplemousse (ou pomelo), le curcuma ou la réglisse sont à proscrire — même en compléments alimentaires — car ils pourraient augmenter la toxicité des chimiothérapies orales et avoir une action toxique sur le foie. Le millepertuis est également contre-indiqué car il peut diviser par deux les effets des médicaments, dont la chimiothérapie orale.

La recherche se tourne vers le microbiote intestinal

Et le sucre ? « *On a longtemps pensé qu'il était la principale source énergétique des cellules cancéreuses et que le supprimer de son alimentation allait affamer la tumeur. Mais la réalité est bien plus complexe. Même privée de sucre, la cellule cancéreuse possède de grandes capacités d'adaptation et contrecarre la baisse de cette source énergétique en utilisant d'autres substrats, comme les acides gras et les acides aminés issus des protéines, pour subsister. Aujourd'hui, il n'y a aucun élément solide montrant que le régime alimentaire pendant la durée des traitements peut influer sur leur efficacité et l'évolution de la maladie* », explique Jean-Ehrland Ricci, directeur de l'équipe de recherche Inserm « Métabolisme, cancers et réponses immunes », à Nice.

Le microbiote intestinal, en revanche, pourrait jouer un rôle dans l'efficacité des traitements. Celle du cyclophosphamide, un agent alkylant très utilisé en chimiothérapie, reposerait ainsi sur la présence dans l'intestin de deux espèces bactériennes (*Enterococcus hirae* et *Barnesiella intestinihominis*). Toutefois, cette voie de recherche doit encore être approfondie avant qu'une supplémentation d'onco-microbiotiques puisse être administrée chez les patients dont le microbiote serait dépourvu de ces bactéries. ■ **S. B.**

BRUNO RAYNARD

VERBATIM

BRUNO RAYNARD

CHEF DE L'UNITÉ TRANSVERSALE DE DIÉTÉTIQUE ET DE NUTRITION DE L'INSTITUT GUSTAVE-ROUSSY À VILLEJUIF (VAL-DE-MARNE)

« Pas de régime restrictif pendant les traitements »

“Nous constatons un engouement important de la part des patients pour le jeûne intermittent, la restriction calorique, protéique, ou le régime cétogène. Diverses enquêtes ont montré que près de 10 % des patients sous traitement anticancéreux réalisent un régime de restriction, particulièrement glucidique. Or, des centaines d'études expérimentales sur les animaux de laboratoire ont été publiées et présentent des résultats très divergents ainsi que des limites importantes qui ne permettent pas d'extrapoler les résultats sur l'humain. Les données actuelles concernant le jeûne et les régimes restrictifs montrent qu'il n'y a pas de preuve d'un effet bénéfique dans le traitement des cancers. En revanche, ces régimes sont un facteur de risque supplémentaire de perte de poids et de fonte musculaire, ce qui aggrave la dénutrition. Ils ne sont donc pas recommandés durant les traitements, d'autant qu'ils peuvent aussi entraîner des troubles du comportement alimentaire (dégoût, peur, lassitude, etc.).”

Des repas peu protéinés, souvent pris seul, des difficultés à mâcher… sont autant de facteurs qui induisent la dénutrition chez les plus de 70 ans.

La dénutrition chez les seniors n'est pas une fatalité

Le programme de recherche européen Fortiphy développe de nouvelles solutions pour les personnes âgées afin qu'elles fournissent à leur organisme des apports suffisants en calories et protéines. Reportage à Dijon.

Gisèle, 80 ans, tout sourire, écoute attentivement Mathilde Gombac, jeune stagiaire à l'Institut national de recherche pour l'agriculture et l'environnement (Inrae) de Dijon. Les deux femmes se connaissent bien. Depuis quatre mois, l'élégante senior est volontaire dans le programme de recherche européen sur la dénutrition Fortiphy, et la jeune étudiante est chargée de ses séances d'évaluation. Aujourd'hui, c'est l'heure du bilan. Dans une des salles réservées à l'expérience au centre de recherche dijonnais, Mathilde prend différentes mesures sur le corps de Gisèle. Elle cherche à savoir si, au terme de l'expérience, la senior a pris de la masse maigre, autrement dit, du muscle. Toute l'équipe de Claire Sulmont-Rossé, responsable du projet, est mobilisée pour la dernière collecte de données. Les résultats de ce programme de recherche financé à hauteur de 900 000 euros devront permettre de développer des stratégies alimentaires innovantes pour éviter la dénutrition chez les seniors.

SHUTTERSTOCK

I. DO O'GOMES

Différentes mesures permettent de vérifier l'augmentation de la masse musculaire chez Gisèle, 80 ans, volontaire du programme de recherche européen sur la dénutrition, après quatre mois de recommandations (activité physique, ajout de protéines).

Ce syndrome se caractérise par un apport insuffisant en calories et en protéines par rapport aux besoins de l'organisme. En France, il toucherait environ 800 000 personnes âgées, selon l'Assurance maladie. « *Avec comme corollaire un risque de mortalité démultiplié* », indique Virginie Van Wymelbeke-Delannoy, chercheuse au CHU de Dijon, et coresponsable du programme de recherche Fortiphy. Alexia Geny, doctorante qui travaille aussi sur l'expérience, en explique les grands principes : « *Nous avons mis au point un programme alimentaire et d'activités physiques adaptées qui favorise notamment le maintien de la masse musculaire chez les personnes de plus de 70 ans. Ensuite, nous l'avons testé sur plus de 140 volontaires pendant quatre mois.* »

Car le plus gros risque de la dénutrition est la perte de muscle. Dès l'âge de 40 ans, les scientifiques constatent une diminution progressive de la masse musculaire. « *Souvent, cette masse musculaire dite maigre est remplacée par de la masse grasse ; ainsi la perte musculaire passe inaperçue,* précise Dominique Dardevet, spécialiste de ce sujet à l'Inrae de Clermont-Ferrand. *En moyenne, cette fonte musculaire s'accélère à partir de 60 ans. En 1989, Irwin Rosenberg, professeur de nutrition et de médecine à l'université Tufts (États-Unis), a donné un nom à ce syndrome : la sarcopénie, qui a même été classée comme une maladie en 2018, bien qu'elle fasse encore l'objet de discussions entre scientifiques.* »

Les mécanismes qui conduisent à la sarcopénie sont nombreux. Ils ont été recensés en 2021 par Petra Wiedmer de l'Institut allemand de nutrition humaine de Potsdam-Rehbrücke, dans la revue *Ageing Research Reviews*. Elle y pointe des phénomènes de stress oxydatif qui conduisent à la mort de cellules musculaires, d'altération du flux sanguin et donc du transport de nutriments, une diminution de la production d'insuline altérant celle de protéines, la prise de certains médicaments comme la cortisone, etc. Claire Sulmont-Rossé relève quant à elle une autre cause : « *Lorsque nous mangeons des aliments contenant des protéines — œufs, viandes, produits laitiers, poissons, légumineuses —, celles-ci sont transformées par la digestion en acides aminés, qui seront ensuite utilisés pour fabriquer de nouvelles protéines utiles à l'organisme. Avec l'âge, après la digestion, l'intestin et le foie ont tendance à "séquestrer" plus d'acides aminés et donc à en laisser moins pour le renouvellement de la masse musculaire.* »

Des exercices physiques pour renforcer les muscles

Dès lors, quelle stratégie adopter pour contrer ces phénomènes ? D'abord rester physiquement actif : « *Il ne s'agit pas forcément de faire du sport,* tempère Dominique Dardevet. *L'activité physique, c'est aussi aller à pied faire ses courses, jardiner, faire son ménage ou se promener. Le principal, c'est que tous les muscles travaillent.* » C'est pourquoi, dans le protocole mis en place par l'équipe dijonnaise, un accompagnement physique des volontaires est prévu. « *Au cours de visites à domicile et d'entretiens téléphoniques, j'ai peu à peu amené les participants à réaliser un programme d'exercices physiques pour renforcer leurs muscles* »

DISPOSITIF

Une IA aide à détecter la dénutrition à l'hôpital

Le CHU de Dijon teste une application d'aide au diagnostic de la dénutrition : un appareil photo, installé sur le chariot de distribution des plateaux, prend un cliché du repas de chaque malade, avant sa distribution, et après sa consommation. Ces deux photos sont ensuite comparées par un logiciel mis au point par les entreprises ATOL CD, Yumain et FoodIntech. Les diététiciennes savent alors exactement ce que le malade a consommé. Si cette quantité est inférieure à ses besoins, une alerte est émise. Pour l'instant, l'IA est fiable à 80 % et pourrait remplacer les traditionnels relevés alimentaires, peu précis. Une innovation intéressante, la dénutrition touchant entre 20 et 40 % des malades hospitalisés selon la Haute Autorité de santé.

explique Charlène Rainat, étudiante en master sciences et techniques des activités physiques et sportives (staps), chargée de ce travail. Elle précise : *« Ce programme a été mis au point par l'équipe de recherche de Peter Clarys et David Beckwee de l'Université libre flamande de Bruxelles, en Belgique. »*

Trouver des solutions pour les personnes en perte d'appétit

Mais il est tout aussi important de repenser ses repas pour augmenter l'apport protéique. *« Il est nécessaire de manger chaque jour 1,1 g de protéines par kilo de masse corporelle ; ainsi, une personne qui pèse 70 kg doit manger 77 g de protéines chaque jour,* insiste Dominique Dardevet. *Et il ne faut pas confondre protéine et viande. Un steak de 100 g, c'est 20 g de protéines. »* D'où l'importance d'augmenter les rations de viande, de poissons, de légumineuses, d'œufs, etc. *(voir le tableau ci-contre).*

Voilà pour la prescription. Or, le problème est qu'à partir de 70 ans, l'appétit diminue. Outre des maladies (dépression, pathologies neurodégénératives) ou un stress important (décès d'un proche, hospitalisation), une cause majeure est la diminution du « confort oral », comme le nomme Claire Sulmont-Rossé : *« Avec l'âge, la dentition est plus abîmée, la bouche sécrète moins de salive, et pour certains, la déglutition devient plus difficile. Or ces altérations peuvent conduire les personnes âgées à éviter de consommer des aliments difficiles à mâcher, tels que la viande. Le contexte dans lequel le repas est pris influence aussi l'appétit : seul, on a tendance à rester moins longtemps à table et à moins manger. De même, quand on vieillit, le goût des aliments peut s'altérer, ce qui peut contribuer à la perte d'envie de manger. »*

D'où la nécessité de trouver des solutions adaptées aux personnes âgées en perte d'appétit. C'est ce que Gisèle a appris pendant les quatre mois de sa participation à l'expérience Fortiphy. Au début du projet, les équipes de l'Inrae et du CHU de Dijon ont réalisé une série de mesures (poids, bilan sanguin, vitesse de marche, masse maigre…) et lui ont demandé de noter sur trois jours le détail de ses repas. Les scientifiques ont ensuite comparé les données notées sur son journal alimentaire avec ses besoins en calories et en protéines. *« La plupart des participants de cette expérience mangent assez équilibré : peu de charcuterie, du fromage modérément, et finalement peu d'aliments sucrés,* constate Lucie Large, responsable du suivi nutritionnel de volontaires. *En revanche, plus de la moitié était en dessous des recommandations en protéines, notamment pour le repas du soir, qui schématiquement était constitué d'une soupe et d'un yaourt. »*

77 g
de protéines
C'est la quantité que doit consommer par jour une personne âgée pesant 70 kg.

L'équipe a donc proposé aux participants plusieurs pistes pour éviter cette carence protéique. *« Notre premier travail a été de leur faire prendre conscience du peu de protéines qu'ils consommaient au cours d'un repas,* explique Alexia Geny. *En plus d'une sensibilisation aux produits qui en contiennent naturellement, nous avons mis au point un livret de recettes enrichies en protéines qui s'inspirent des recettes traditionnelles : par exemple, une quiche lorraine riche en œufs, ou un gâteau dans lequel une partie de la farine est remplacée par de la poudre d'amandes. Nous leur avons aussi appris des méthodes pour rendre la viande plus tendre, comme la découpe à contre-fibres, ou les cuissons à basse température. Enfin, nous leur avons fourni des protéines de lait et de soja à incorporer dans leurs préparations culinaires. »*

Des apports en protéines très variables

Aliment	Portion pour un apport de 20 g de protéines
Fromage	90 grammes
Viande - poisson	100 g
Œuf	148 g
Haricots rouges	223 g
Lentilles	238 g
Pain	243 g
Pois chiches	266 g
Pâtes	501 g
Yaourt	517 g
Lait	610 g
Riz	685 g

SOURCE : INRAE UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE/ UNITÉ DE NUTRITION HUMAINE

100 protéines recensées pour réaliser des recettes faciles

Trouver des protéines qui ne modifient ni le goût ni la texture d'un plat a été un véritable défi : plus de 100 références ont été identifiées. Les plus prometteuses ont été testées par une équipe de recherche dirigée par Øydis Ueland à l'institut norvégien de recherche alimentaire (Nofima), pour les intégrer dans des recettes faciles à réaliser à domicile. Ce travail n'a pas été vain, car l'intérêt grandissant des participants pour les protéines a été une bonne surprise de l'étude. *« Si, à la fin de l'accompagnement nutritionnel, les seniors ont toujours du mal à consommer des légumineuses, au fur et à mesure de nos conseils et de nos idées de recettes, nombre d'entre eux ont notamment adopté les protéines de soja »,* constate Lucie Large.

Pour Gisèle, le bilan est positif. Elle a pris l'habitude d'ajouter des protéines à ses repas et veille à rester très active durant la journée. Pour les scientifiques, commence un long travail d'analyse des données afin de répondre à la question qui a motivé cette recherche : le programme a-t-il permis aux volontaires d'augmenter leur masse musculaire ? Si oui, les acquis de l'expérience (recettes de cuisine, exercices physiques, conseils nutritionnels…) seront largement diffusés auprès des professionnels et du grand public. Les premiers résultats sont attendus en décembre. ■ **I. do O'G.**

Apparaissant le plus souvent durant la petite enfance, les tics sévères persistent à l'âge adulte dans un tiers des cas.

►

Tics

Mieux les comprendre pour mieux les soigner

Grâce à l'imagerie médicale, les scientifiques commencent à entrevoir ce qui se passe dans le cerveau d'une personne atteinte d'un tic. Leurs travaux ouvrent la voie à une prise en charge plus ciblée et à la mise au point de nouveaux traitements.

Par Sylvie Riou-Milliot

Certains clignent des yeux, froncent les sourcils, mettent en mouvement différentes parties de leur corps (tête, tronc, membres) en se contorsionnant de manière étrange. D'autres se raclent la gorge, toussent, reniflent, sifflent, émettent des bruits bizarres. Tous sont atteints de tics (de *ticchio*, « caprice » en italien) moteurs et vocaux. Ce sont toujours des manifestations involontaires soudaines, brèves, intermittentes, parfois associées à des troubles obsessionnels compulsifs (TOC, *voir le tableau p. 71*).

Si ces tics débutent le plus souvent dans l'enfance, entre 5 et 7 ans, et se combinent parfois, comme dans le cas du syndrome de Gilles de La Tourette (SGT) — du nom du psychiatre qui le premier a décrit cette maladie à la fin du XIXe siècle —, ils disparaissent aussi spontanément vers 20 ans dans plus de la moitié des cas. Pourquoi ? Le mystère est de mise. Aujourd'hui, si la prononciation involontaire de mots orduriers (coprolalie) demeure source de railleries *(lire l'encadré p. 70)*, la recherche est particulièrement active pour comprendre les mécanismes en jeu dans le SGT, cette étrange affection neurologique aux composantes génétiques et environnementales suspectées. La preuve avec différents travaux présentés lors de la 15e conférence de la Société européenne pour l'étude du syndrome de la Tourette (ESSTS) qui s'est déroulée au début de l'été à Bruxelles (Belgique) et a regroupé l'ensemble des spécialistes européens.

Grâce à l'imagerie cérébrale, les scientifiques commencent à entrevoir ce qui se passe dans le cerveau d'une personne atteinte d'un tic *(lire l'encadré p. 72)*, juste avant que celui-ci ne survienne. Une avancée face à une pathologie dont le délai moyen ▶

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

5 à 7 ans
La durée de l'errance diagnostique pour les patients.

0,5 à 1 %
Le taux de prévalence du syndrome de Gilles de La Tourette dans la population.

30 à 50 %
Le taux d'efficacité moyen des traitements.

entre l'apparition des symptômes et le diagnostic est estimé à cinq ans. Autant d'années d'errance médicale : *« Les psychiatres et les neurologues se renvoient la balle, quand les patients ne se retrouvent pas chez l'ophtalmologiste ou le pneumologue pour une suspicion de conjonctivite ou d'asthme »*, regrette le Dr Andreas Hartmann, neurologue à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris, responsable du centre national de référence du syndrome de Gilles de La Tourette et principal organisateur du congrès bruxellois.

Seuls 10 à 20 % des patients sont pris en charge

Une fois le diagnostic posé, tous les patients atteints de tics ou d'un SGT ne relèvent pas d'une prise en charge médicale ; seuls 10 à 20 % des patients sont concernés. Avant de mettre celle-ci en place, il faut toujours dédramatiser et rassurer des parents parfois désemparés. En effet, la plupart des tics se font simples et discrets — comme le clignement d'œil, le froncement des sourcils ou même les bruits dans les cas les plus légers. *« Mais la sévérité est très variable dans le temps et ce chez une même personne, rendant le repérage parfois difficile »*, indique le spécialiste. *« D'ailleurs, si le "tiqueur" se concentre, il peut parvenir à réprimer son tic qui n'est alors pas toujours décelable en consultation »*, confirme Jean-François Mittaine, actuel président de l'Association française du syndrome de Gilles de La Tourette (AFSGT) et parent d'un enfant atteint par cette pathologie. C'est la raison pour laquelle les spécialistes suggèrent aux familles de ne pas hésiter à se filmer et à venir en consultation avec des vidéos. *In fine*, la prise en charge dépend du ressenti du jeune tiqueur, de sa gêne, de son vécu émotionnel, de son éventuel isolement social, d'autres pathologies associées (trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité, autisme, anxiété…). Autant d'éléments qui orienteront vers la nécessité d'une approche multidisciplinaire faisant intervenir un neurologue, un psychologue, un orthophoniste… Sans oublier le recours précieux aux thérapies comportementales *(lire l'encadré p. 73)*, et ce quel que soit le degré de sévérité des tics.

Le port de ce bracelet à stimulation électrique permet d'interférer sur les mouvements involontaires.
NEOPULSE

La stimulation cérébrale profonde pour les cas extrêmes

Mais pour certains, la vie peut rapidement se transformer en calvaire, *« des patients honteux et gênés ne prennent jamais le métro et ne sortent pas de chez eux »*, signale Velina Negovanska, psychologue clinicienne à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, car leurs tics sont trop intenses ou trop bruyants. Face aux formes les plus extrêmes et handicapantes, la stimulation cérébrale profonde, qui consiste à appliquer des petites décharges électriques par une électrode implantée dans le cerveau, a prouvé son efficacité. Mais au vu de sa complexité, cette technique n'est proposée que de manière très marginale : moins de cinq cas par an en France, de l'ordre de 100 dans le monde. Aussi,

DIAGNOSTIC

La caricature du syndrome de La Tourette

Parmi les signes du syndrome de la Tourette, caractérisé par l'association de plusieurs tics moteurs associés à au moins un tic vocal évoluant depuis un an, certains interpellent plus que d'autres. Comme la répétition de mots orduriers (coprolalie) ou de gestes obscènes (copropraxie) en raison de leur survenue souvent incongrue et inappropriée. Parfois dérangeants, ils sont toujours sources de moqueries. Mais, contrairement à une idée bien ancrée, ces manifestations ne sont présentes que chez une minorité de patients, moins de 10 % des cas. Par conséquent, leur absence ne permet absolument pas d'éliminer le diagnostic. De plus, si ces symptômes sont les plus connus du grand public, c'est aussi ceux qui sont le plus mal compris. Au-delà de la stigmatisation qu'ils génèrent, ils sont souvent responsables en milieu scolaire de punitions (heures de colle, renvois des cours).

SYNDROMES

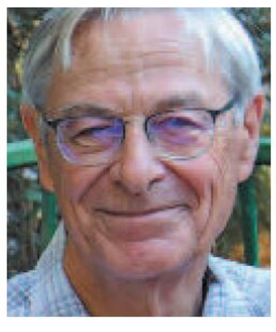
À ne pas confondre avec les tics fonctionnels et les TOC

C'est un autre effet collatéral du Covid, peu connu. Dans les mois qui ont suivi la pandémie, une neuropsychiatre allemande, Kirsten Müller-Vahl, de la faculté de médecine de Hanovre (Allemagne), a publié dans la revue *Brain* un article mettant en garde contre une propagation du syndrome de Gilles de La Tourette par… Internet! En effet, les spécialistes avaient remarqué une montée en puissance de vidéos et de témoignages sur les réseaux sociaux. Davantage de personnes ont alors consulté des neurologues, mais il ne s'agissait pas de « vrais » tics la plupart du temps. Kirsten Müller-Vahl a décrit ce syndrome comme le premier cas de *« mass social-media induced illness »*, c'est-à-dire d'épidémie transmissible par Internet. Il s'agissait de tics dits fonctionnels, très différents des vrais tics *(voir le tableau)*. Et tout se complique encore un peu plus en cas d'association aux troubles obsessionnels compulsifs (TOC), liés, eux, à la venue de pensées invasives.

VRAIS TICS	TICS FONCTIONNELS	TOC
Début dans l'enfance	Apparition tardive	Âge d'entrée variable, avant 25 ans
Plus de garçons que de filles	Plus de filles	Autant de garçons que de filles
Capacité temporaire à réprimer le tic	Incapacité à réprimer	Comportements répétitifs irraisonnés et incontrôlables mis en place pour atténuer l'arrivée de pensées dérangeantes
Perception de signes avant-coureurs	Pas de signes avant-coureurs	Pas de signes avant-coureurs
Insensible à la distraction	Sensible à la distraction	Insensible à la distraction
Comorbidités : anxiété, hyperactivité	Troubles de la personnalité, histoires de vie difficiles	Forte anxiété

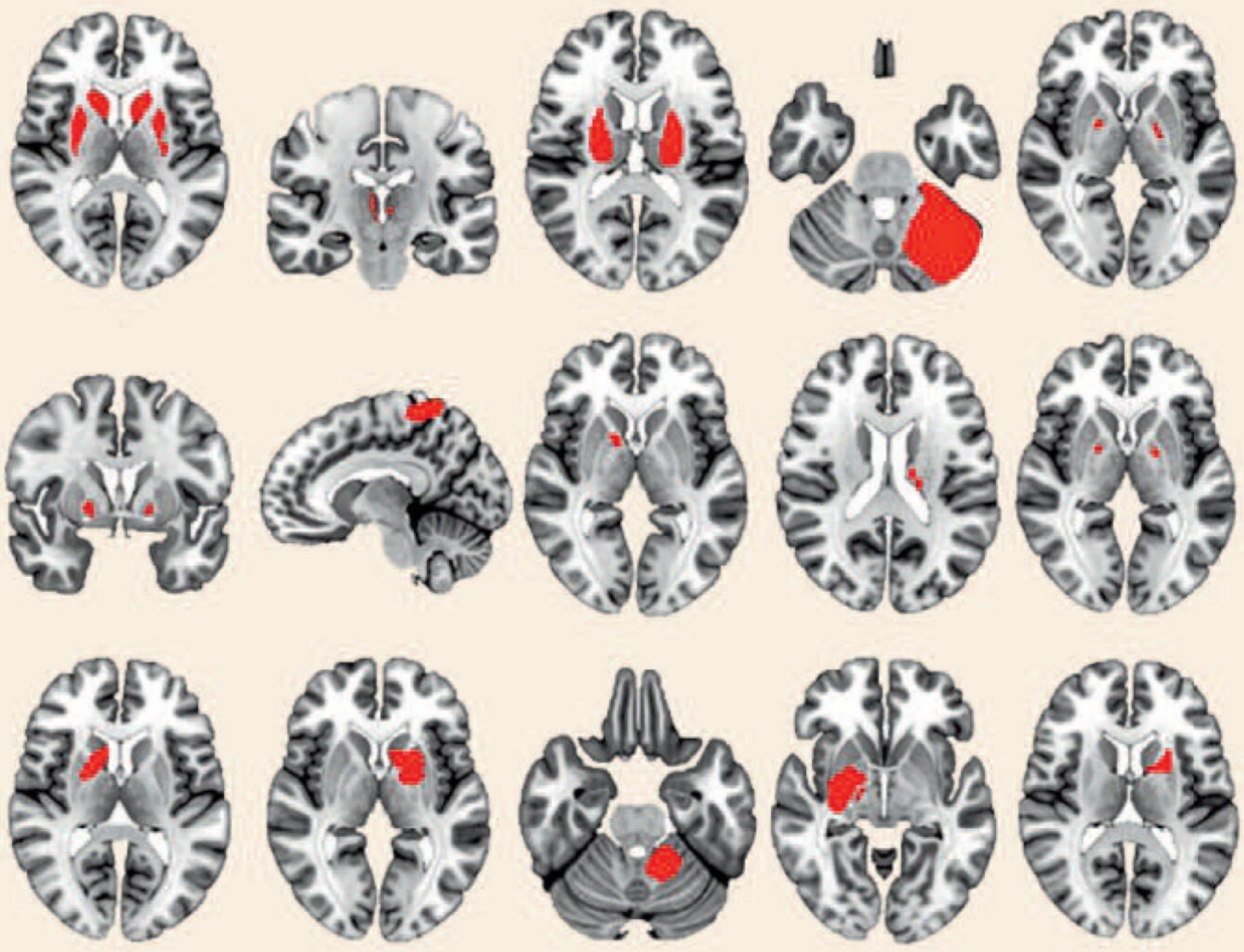
d'autres approches plus simples de stimulation sont en développement. C'est le cas d'une technique pour le moins originale développée par une équipe de l'université de Nottingham (Royaume-Uni), conduite par le Dr Stephen Jackson. Reposant sur une stimulation électrique appliquée au niveau du poignet, elle a été menée en lien avec la société NeuroTherapeutics qui en a conçu le dispositif, un bracelet appelé Neupulse. Pourquoi le choix de cette zone ? Parce que là se situe le nerf médian, le plus accessible des nerfs périphériques connecté au cortex sensori-moteur. Or, des travaux préliminaires menés chez l'animal ont démontré que la stimulation du nerf médian permettait d'interférer sur le mouvement. *« Nous avons surtout voulu développer une méthode non invasive »*, précisait à Bruxelles Stephen Jackson. L'équipe britannique a en effet choisi de pallier les dysfonctionnements des neurones sensorimoteurs impliqués dans la réalisation des tics en les resynchronisant. Comment ? En renforçant par des impulsions électriques (une dizaine de hertz pendant une minute par tranche de six minutes) certains rythmes cérébraux connus, ceux de type « mu » liés à la suppression du mouvement.

Dans un premier temps, les chercheurs ont placé les électrodes d'un dispositif classique de neurostimulation sur la peau du poignet de 19 patients atteints du syndrome de La Tourette ; les premiers résultats prometteurs ▶


FRANÇOIS MITTAINE

« Le patient peut parvenir à réprimer son tic, qui n'est alors pas toujours décelable en consultation »

François Mittaine, président de l'Association française du syndrome de Gilles de La Tourette (AFSGT)



Localisation des lésions (en rouge) provoquant des tics dans le cerveau de 15 patients parmi les 19 étudiés.

J-J ZOUKI ET AL.

IMAGERIE

Un réseau cérébral spécifique identifié

Que se passe-t-il dans le cerveau d'une personne atteinte de tics? C'est l'une des nombreuses questions auxquelles les neuroscientifiques tentent depuis plusieurs années d'apporter des réponses. Des dysfonctionnements de certaines structures cérébrales profondes du cerveau (noyaux gris centraux) ou des anomalies de la sécrétion de neuromédiateurs (dopamine, Gaba) sont autant d'hypothèses régulièrement avancées mais imparfaitement démontrées, les protocoles de recherche étant ici particulièrement difficiles à mettre sur pied. Toutefois, le voile commence à se lever. Ainsi, dans de récents travaux australiens primés au congrès à Bruxelles, des chercheurs se sont intéressés à une sensation très particulière ressentie par la plupart des « tiqueurs », juste avant la réalisation des tics. Dite sensation prémonitoire (« *urge* » en anglais), il s'agit d'une perception désagréable, une espèce de tension intérieure envahissante pour la personne qui va trouver dans la réalisation de son (ou des) tic(s) le moyen de soulager l'inconfort qui l'envahit. Des travaux préliminaires avaient déjà montré qu'avant la mise en action du tic, plusieurs zones cérébrales étaient activées (cortex cingulaire, insula…). L'étude de Jade-Jocelyne Zouki de l'université de Deakin (Australie), publiée en 2023 dans la revue *Brain Communications*, a eu recours à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle pour examiner l'activité cérébrale à travers les modifications du flux sanguin. Elle a réussi à identifier un nouveau réseau cérébral particulier impliqué dans ce phénomène de sensation prémonitoire. En lien avec les ganglions de la base, il implique par exemple la région du précunéus, une structure qui pourrait représenter une cible thérapeutique facilement accessible en cas de stimulation cérébrale non invasive. Une autre équipe, celle de l'université Yale (États-Unis), est, elle, déjà en train de concevoir des organoïdes cérébraux à partir de cellules cutanées de patients atteint du syndrome de la Tourette. Leurs travaux publiés également cette année dans *Molecular Psychiatry* ont pour objectif est de créer des lignées de cellules souches produisant des neurones des noyaux gris centraux et de tenter d'en percer les anomalies.

ont été publiés en 2020 dans la revue *Current Biology*. Depuis, un dispositif entièrement portable, le bracelet, a été développé. Il permet une utilisation plus facile, au domicile des patients. Un essai clinique, toujours en cours et conduit auprès d'un groupe plus large d'une centaine de personnes, a démarré en 2022. Cette fois, les chercheurs ont en quelque sorte « rusé » et ont comparé de vraies stimulations à des fausses, en se servant d'enregistrements vidéo réalisés au domicile des patients pour juger de l'efficacité simultanée des deux types de stimulations sur les tics.

Une réduction de 25 % de la sévérité des tics

Selon les premiers résultats intermédiaires présentés à Bruxelles, le port du bracelet (à raison d'une quinzaine de minutes par jour, cinq jours par semaine, pendant un mois) a permis de réduire de 25 % la sévérité des tics selon l'échelle Yale Global Tic Severity scale (YGTSS), l'instrument de référence utilisé par les neurologues. Forte de ces résultats, l'équipe travaille déjà sur une application reliée au bracelet et au smartphone du patient afin de permettre un meilleur contrôle des tics. « *Reste à démontrer que l'effet durera dans le temps* », souligne Andreas Hartmann. Une commercialisation du dispositif est prévue d'ici à 2026.

AP-HP

« Identifier des marqueurs prédictifs de sévérité serait d'une grande aide pour proposer au plus tôt une prise en charge »

Andreas Hartmann, neurologue à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris

En parallèle, les approches pharmacologiques traditionnelles demeurent à l'étude, avec plusieurs innovations présentées au congrès. L'espoir est mis dans la réduction des effets secondaires tels que la prise de poids, fréquente avec les molécules actuelles de l'halopéridol (Haldol) et de l'aripiprazole (Abilify). La firme Emalex Bioscience, par exemple, conduit des travaux sur l'écopipam, un bloqueur sélectif des récepteurs de la dopamine-1, le premier d'une nouvelle classe de médicaments. Les résultats de l'essai mené sur 68 sites et incluant 153 personnes âgées de 6 à 18 ans ont été publiés dans la revue *Pediatrics* au début de l'année. Ils révèlent une meilleure baisse moyenne de sévérité du score des tics en comparaison du placebo. De son côté, la firme israélienne Scisparc vient de démarrer des essais avec un tout autre produit, le SC110, à base de dronabinol, la forme synthétique du THC — la molécule psychotrope du cannabis — approuvée par la FDA, l'administration américaine des médicaments. Mais, plus que la mise au point de nouvelles molécules, « *ce qui manque surtout aujourd'hui, c'est le repérage des patients (environ 30 %) chez qui les tics ne vont pas disparaître à la fin de l'adolescence mais s'aggraver,* explique Andreas Hartman. *Identifier des marqueurs prédictifs de sévérité serait d'une grande aide pour proposer au plus tôt une prise en charge.* » C'est l'un des enjeux du vaste programme international de recherche Enigma-TS (Enhancing NeuroImaging Genetics through Meta Analysis for Tourette Syndrome). Coordonné par une neuroscientifique américaine de l'université Purdue, Peristera Paschou, ce groupe de travail, auquel la France participe avec 11 autres pays, s'est donné pour but de partager des bases de données de neuro-imagerie et de génétique afin de décrypter le « mystère Tourette ». En attendant, « *il serait bon que la société change aussi son regard sur les tics,* précisait à Bruxelles Michele Dunlap, présidente de l'association internationale Tics and Tourette Across the Globe (TTAG), *et que les malades soient plus inclus, mieux compris. Nous avons besoin de bienveillance, pas de moquerie* ». ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- Le site du centre de référence national du syndrome de Gilles de La Tourette (SGT) : **sciav.fr/921tourette**
- L'association française du SGT : **www.france-tourette.org**
- La Société européenne du SGT : **https://essts.org**
- Gilles, ma sœur et moi, de Camille Descroix, un podcast d'Arte radio : **sciav.fr/921gilles**

TECHNIQUES

Vivre avec ses tics

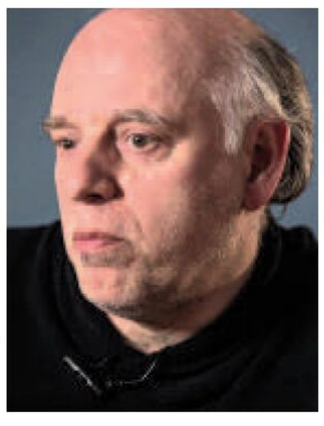
Quand les tics se font envahissants et gênants pour la personne atteinte, deux principales techniques comportementales sont proposées. Celle dite d'inversion d'habitude (Habit Reversal Training) et celle dite de prévention de l'exposition et de la réponse (Exposure Response Prevention). En pratique, dans le premier cas, il s'agit d'apprendre des mouvements antagonistes entrant en compétition avec la réalisation motrice ou vocale des tics (garder les yeux ouverts en cas de clignement, respirer en continu par la bouche pour moins renifler). Dans le second cas, tout repose sur une habituation graduelle de la suppression des tics, l'objectif étant de résister par des techniques de relaxation et de concentration. Une forte motivation est dans tous les cas impérative. Car le travail commencé en séance avec le thérapeute devra se répéter quotidiennement au domicile pendant au moins six mois.

L'héritage du Human Brain Project

Dix ans après son lancement, ce projet européen n'est pas parvenu à développer un jumeau numérique du cerveau. Mais des progrès technologiques majeurs ont été enregistrés, notamment avec la création d'un atlas 3D des connexions neuronales.

Faire « vivre » un cerveau humain virtuel complet, telle était la promesse du très ambitieux Human Brain Project. Sélectionné en 2013 dans le cadre des projets FET Flagship (Initiative phare des technologies futures et émergentes, en français) de l'Union européenne*, il devait bénéficier d'un financement à hauteur d'un milliard d'euros sur dix ans. Nourri par toutes les données neurophysiologiques disponibles et de l'imagerie médicale de pointe, le Human Brain Project (HBP) devait ainsi simuler, grâce à des supercalculateurs, l'activité et les interactions des quelque 200 milliards de cellules que compte le cerveau humain — environ 85 milliards de neurones et 120 milliards de cellules gliales en soutien des premiers. De quoi élucider tous les mystères de l'organe le plus complexe du corps humain, et en particulier des maladies qui le touchent.

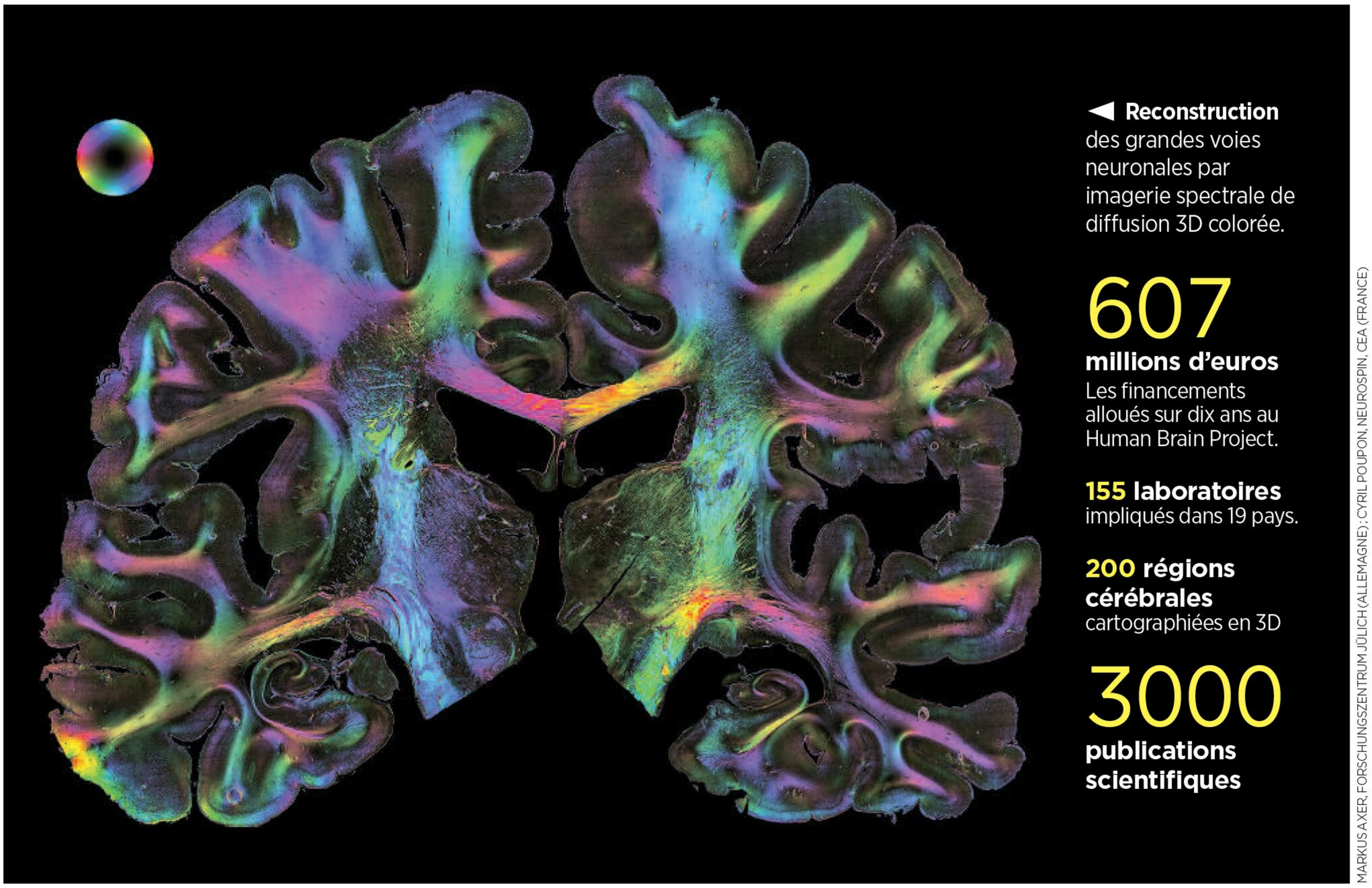
Las ! Dix ans après, alors que le projet a officiellement pris fin en octobre dernier, le jumeau numérique complet du cerveau reste encore un rêve inaccessible. Outre le caractère irréaliste de l'objectif, pointé dès le départ par nombre de spécialistes, le cours du programme européen n'a pas été un long fleuve tranquille. Portée à l'origine sous la forme d'un projet très centralisé par Henry Markram, professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), l'ambition s'est vite confrontée à des dissensions dans la communauté des chercheurs. Résultat : le neuroscientifique est contraint à la démission en 2015 pour sa mauvaise gestion et le projet se décentralise. « *Henry Markram est une personnalité charismatique et visionnaire, il faut lui reconnaître ces qualités sans lesquelles le Human Brain Project n'aurait peut-être pas été retenu comme Flagship par l'Union européenne,* estime Alain Destexhe, directeur de recherche CNRS à l'Institut des neurosciences Paris-Saclay, l'un des rares acteurs à avoir fait partie du projet du début à la fin. *Le problème est qu'il a trop mis en avant ce que lui faisait et pas assez ce que les autres faisaient.* » Ainsi, la réorganisation du projet va conduire les financements européens à être plus fragmentés et, peut-être, mieux distribués parmi les 155 institutions de 19 pays de l'Union européenne qui auront participé au pro-



RYTHM/DR

« Un tiers du projet a consisté à mieux comprendre le fonctionnement du cerveau, à l'échelle du millimètre »

Alain Destexhe, directeur de recherche CNRS à l'Institut des neurosciences de Paris-Saclay



MARKUS AXER, FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH (ALLEMAGNE) ; CYRIL POUPON, NEUROSPIN, CEA (FRANCE)

◄ Reconstruction des grandes voies neuronales par imagerie spectrale de diffusion 3D colorée.

607
millions d'euros
Les financements alloués sur dix ans au Human Brain Project.

155 laboratoires
impliqués dans 19 pays.

200 régions cérébrales
cartographiées en 3D

3000
publications scientifiques

gramme. Mais sur le milliard d'euros promis au départ, seuls 607 millions auront finalement été alloués, dont 406 millions provenant de l'Union européenne.

Une carte détaillée de la zone essentielle pour la mémoire

« L'échec de l'objectif initial était évident dès le départ, et ne constitue pas en soi une déception. Le vrai échec est de n'avoir pas vraiment su rassembler la communauté des neurosciences autour de ce projet », relativise ainsi Bertrand Thirion, responsable de l'équipe Parietal à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), spécialisée dans le décodage cérébral des fonctions cognitives. Les résultats scientifiques, eux, sont nombreux. *« Il y a d'abord la place très importante donnée à la recherche fondamentale,* relève Alain Destexhe. *Un tiers du projet a consisté à mieux comprendre le fonctionnement du cerveau, à l'échelle du millimètre.* » Par exemple, des algorithmes uniques ont permis de produire une carte détaillée de la région CA1 de l'hippocampe, une zone essentielle pour la mémoire, contenant environ 5 millions de neurones et 40 milliards de synapses.

Mais l'héritage le plus important est la plateforme Ebrains, une infrastructure européenne gratuite et ouverte à la communauté neuroscientifique (comme au grand public, qui peut s'amuser à l'explorer malgré sa grande complexité). Celle-ci héberge de nombreux atlas 3D du cerveau élaborés à différentes échelles ainsi que beaucoup d'outils et logiciels pour l'analyse des données de toutes sortes. *« Ebrains est une superbe contribution ! C'est, de loin, l'atlas le plus précis du connectome humain* [relatif aux connexions cérébrales] », s'enthousiasme Alain Destexhe. *« Avant cela, la cartographie du cerveau était très mal connue »*, abonde le Pr Josselin Houenou, psychiatre au CHU Henri-Mondor, à Créteil (Val-de-Marne). Lui et son équipe s'en sont, par exemple, servis pour simuler le cerveau de patients schizophrènes chez qui il existe un déficit d'accès à la conscience des informations. Autrement dit, un stimulus a chez eux plus de difficulté à être conscientisé — un phénomène cérébral important dans l'apparition de symptômes psychotiques (hallucinations, notamment). En recourant à Ebrains, l'équipe de Josselin Houenou a ainsi pu mettre en évidence une altération des faisceaux de neurones dans la matière blanche des malades à l'origine de cette mauvaise diffusion de l'information dans le cerveau. Sur le même modèle, ils ont également pu tester des hypothèses sur la connectivité cérébrale de l'autisme. D'autres applications du même type ont eu lieu dans le domaine de l'épilep- ▶

APPLICATIONS

Un pas de géant pour les victimes de lésions cérébrales

Les connaissances fondamentales et les cartographies fines du cortex obtenues dans le cadre du Human Brain Project (HBP) ont déjà, directement ou indirectement, des implications cliniques très concrètes.

Faire remarcher les paralysés

C'est par exemple le cas des essais menés avec succès en Suisse par Grégoire Courtine et Jocelyne Bloch (École polytechnique fédérale de Lausanne et CHU Vaudois), qui ont permis de rendre l'usage de leurs jambes à des paraplégiques depuis plusieurs années. Les implants de stimulation électrique de la moelle épinière des patients ont en effet été développés à partir d'expériences virtuelles sur une plateforme de neurobotique issue du HBP. Les schémas d'activation des implants contiennent ainsi des modèles informatiques des circuits neuronaux de la moelle épinière créés dans le cadre du projet.

CHUV 2022 | WEBER GILLES/EPFL

L'implant cérébral a permis au patient de piloter ses jambes par la pensée.

Des neuroprothèses pour rendre la vue

En 2020, une équipe hispano-néerlandaise a montré dans *Science* qu'il était possible de restaurer la vue grâce à une stimulation fine du cortex visuel. Les expériences réalisées sur deux singes — voyants et sachant reconnaître les lettres — ont consisté à leur faire identifier des signes à partir d'impulsions électriques envoyées directement dans le cortex visuel. Les animaux ont ainsi pu voir des lignes et des lettres sans utiliser leurs yeux. Si la neuroprothèse développée grâce aux atlas du HBP ne permettait pas de discerner couleur ou profondeur des images, elle produisait déjà des pixels de haute définition. À reproduire chez l'humain.

Vers la biopsie virtuelle du cerveau

Au centre Neurospin (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Paris-Saclay), l'équipe de Cyril Poupon a développé une approche reposant sur des simulations à grande échelle et des algorithmes d'apprentissage automatique pour décoder *in vivo* l'organisation cellulaire des tissus cérébraux sains et pathologiques. Objectif : identifier les caractéristiques d'une tumeur cérébrale de façon non invasive, à partir des données d'IRM.

sie, permettant de modéliser suffisamment bien la connectivité cérébrale des malades pour identifier les foyers où se déclenchent les crises et les chemins de propagation de la surcharge électrique propre à chaque épileptique. « *De fait, on parvient aujourd'hui à modéliser le cerveau entier, mais pas à l'échelle cellulaire comme c'était annoncé,* développe Alain Destexhe. *Nous restons à une résolution qui correspond à celle de l'imagerie. En quelque sorte, le jumeau numérique existe, mais à la centaine de micromètres près, pas encore au niveau cellulaire.* » Reste qu'à ce jour, près de 3000 études scientifiques ont été publiées dans le cadre du Human Brain Project, ou grâce aux cartes et logiciels mis à disposition de la communauté par la plateforme Ebrains.

L'autre enseignement de taille — qui rejoint en partie la vision d'origine de Henry Markram —, selon le spécialiste en intelligence artificielle Bertrand Thirion, c'est « *que l'informatique progresse plus vite que les neurosciences ! En dix ans, notre compréhension de la cognition a davantage bénéficié des leçons reçues de l'intelligence artificielle que de l'observation du cerveau. L'idée qu'il faut utiliser la simulation en la faisant passer à l'échelle, par étapes, reste donc d'actualité. Il faut maintenant réfléchir à la manière de passer d'une échelle à l'autre progressivement, sans griller les étapes !* » Reste une inconnue, alors que les financements européens sont désormais taris : que va devenir Ebrains, l'héritage technologique majeur du projet ? L'infrastructure ne demande qu'à être exploitée et enrichie. Mais pour qu'elle perdure, il faut qu'elle soit financée. « *Ça ne fonctionne pas tout seul, il faut que la plateforme soit entretenue. Et elle ne le sera que si elle est largement adoptée par la communauté neuroscientifique* », prévient Alain Destexhe. ■

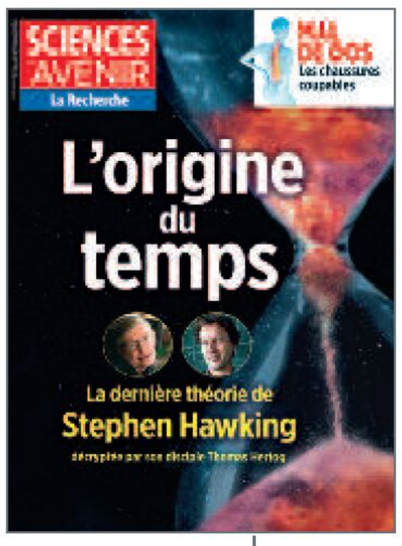
Hugo Jalinière

* Trois autres grands projets européens (1 milliard d'euros sur dix ans) ont été retenus depuis : le Graphene flagship (2013), le Battery 2030+ (2020) et le Quantum Technologies Flagship (2018).

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL



LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

STEPHANE COMPOINT / ONLYFRANCE.FR

Classé au patrimoine mondial, le Mont-Saint-Michel a connu au moins trois phases d'agrandissement entre le XI^e^ et le XIII^e^ siècle. Les recherches archéologiques ont notamment permis d'établir que la Merveille, immense ensemble d'art gothique qui correspond au cloître, au réfectoire et aux logis, est en réalité composite, et aurait été édifiée à partir de constructions plus anciennes.

Les derniers mystères du Mont-Saint-Michel

Les fouilles et recherches en cours sur le site, dont on célèbre cette année le millénaire de la construction de son abbatiale, ont permis de nouvelles découvertes sur son histoire. Mais de nombreuses questions demeurent, notamment sur son origine.

Par Marine Benoit

Le Mont-Saint-Michel a beau être la première destination touristique de France après Paris et Versailles, avec ses 3 millions de visiteurs chaque année, il n'avait pas fait, pour autant, l'objet d'une mise en commun des travaux scientifiques à son sujet depuis 1966. Voilà qui ressemble à une éternité pour un lieu autant chargé d'histoire. Impossible donc pour Mathilde Labatut, conservatrice des monuments historiques à la direction des affaires culturelles (Drac) de Normandie, Fabien Paquet et Christophe Manœuvrier, tous deux maîtres de conférences en histoire médiévale à l'université de Caen Normandie, de ne pas saisir cette année l'occasion du millénaire de la construction de l'abbatiale romane pour mettre en commun l'avancée des savoirs. En juin, les trois historiens ont rassemblé des dizaines de chercheurs lors d'un colloque de quatre jours pour échanger autour du Mont-Saint-Michel dans son ensemble : son abbaye, son sanctuaire, ses textes bien sûr, mais aussi son village médiéval. Faut-il comprendre par là qu'il reste des choses à découvrir sur ce si célèbre rocher auquel ont été consacrés des centaines d'ouvrages et de documentaires ? « *Bien sûr,* assure Mathilde Labatut, *tout un tas de zones d'ombre subsistent sur l'histoire du Mont, mais depuis 1966 la recherche a permis d'en lever un certain nombre. L'objectif du colloque était justement de faire le point sur toutes ces nouvelles connaissances.* »

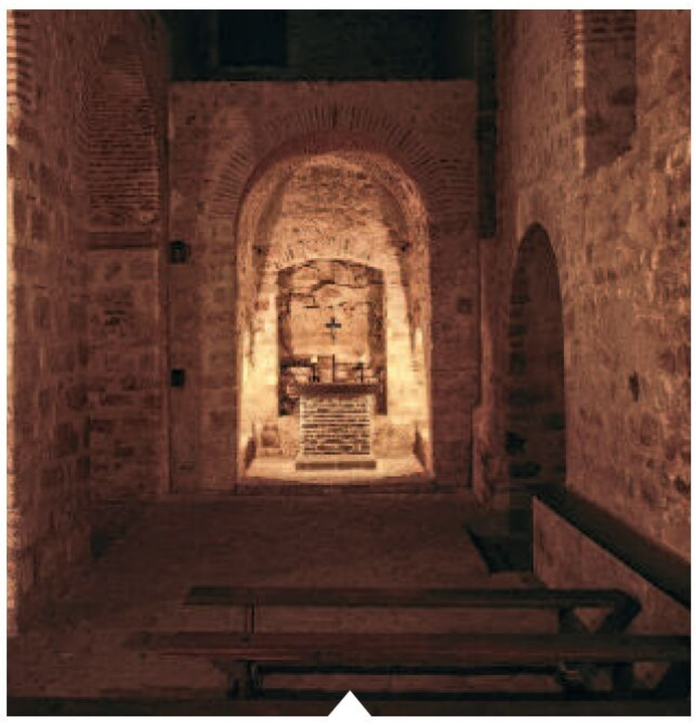
C'est sans doute sur la question des origines de l'abbaye et des premières populations implantées au Mont que planent encore les plus grands points d'interrogation. La légende, relatée dans la *Revela-*

STEPHANE COMPOINT/ONLYFRANCE.FR

Situé au sommet du Mont, le cloître, dont la construction est achevée en 1228, comporte 137 colonnes de granit.

tio ecclesiae sancti Michaelis archangeli in Monte Tumba — l'un des plus vieux textes sur le Mont daté du IXe siècle — nous dit qu'en l'an 708, l'archange Michel serait apparu à trois reprises en songe à Aubert, évêque d'Avranches, pour lui demander d'édifier un sanctuaire en son nom sur le rocher, appelé alors Mont Tombe. Il faut bien comprendre ce qu'était celui-ci : un îlot granitique aux contours acérés, rattaché au continent par un isthme totalement immergé lors des grandes marées. En somme, un terrain bien peu accueillant pour des travaux d'ampleur. L'archange, agacé de se voir opposer trois refus successifs, aurait alors fait un trou dans le crâne de saint Aubert en y posant son doigt *(lire l'encadré p. 80)*. De quoi motiver l'homme d'église mutilé à s'exécuter. Aubert fait donc construire à même la roche le sanctuaire que sert une communauté de 12 chanoines, avant sa transformation en 966 en abbaye bénédictine, sous l'impulsion du comte de Rouen Richard 1er.

« Il est bien sûr compliqué de faire le tri entre la légende et la réalité, en premier lieu parce que la transcription de la vérité n'est pas le souci premier des textes médiévaux », explique Fabien Paquet, spécialiste de l'histoire religieuse des mondes normands médiévaux et de l'écriture de l'histoire au Moyen Âge. Autre obstacle de taille : le manque cruel de sources écrites. *« Leur nombre est extrêmement faible comparé à n'importe quelle autre abbaye en France, même de petite taille,* regrette l'expert. *Les aléas de l'histoire nous avaient déjà fait perdre beaucoup d'écrits avant la Seconde Guerre mondiale, mais celle-ci a donné le coup de grâce : le bombardement des archives de la Manche les a réduits à peau de chagrin. D'où l'importance des données archéologiques pour caractériser les différentes occupations et leur apporter des datations. »*



G. SIOEN/DEA PICTURE LIBRARY/BRIDGEMAN

La chapelle de Notre-Dame-sous-Terre, située sous la nef de l'église abbatiale, a été datée de la première moitié du xe siècle grâce à l'archéométrie.

Depuis une dizaine d'années, de nouvelles technologies relevant de l'archéométrie (un panel de méthodes d'analyses chimiques et physiques), comme la thermoluminescence (méthode de datation avec des minéraux cristallins) ou encore l'archéomagnétisme (autre méthode de datation grâce à l'enregistrement des variations du champ magnétique terrestre), ont permis d'obtenir des informations inédites sur l'histoire du site. Plus précisément, sur celle d'un énigmatique bâtiment, Notre-Dame-sous-Terre, petite chapelle aux voûtes solides et aux piliers massifs, longtemps considérée comme le fameux sanctuaire bâti par saint Aubert au VIIIe siècle. Redécouvert dans la seconde moitié du XIXe siècle lors de travaux de restauration, cet édifice est considéré à ce jour comme le plus ancien du Mont, si l'on fait abstraction d'un possible dispositif de fortification récemment découvert dans le village en contrebas. *« Et ce même si l'étude archéologique des maçonneries de Notre-Dame-sous-Terre réalisée entre 2003 et 2008 nous a réservé quelques surprises*

chronologiques qui obligent à prendre de la distance avec la légende », révèle Gaël Carré, ingénieur d'études au service de l'archéologie de la Drac de Normandie. La datation des murs par thermoluminescence et par radiocarbone a en effet permis de déterminer avec certitude que Notre-Dame-sous-Terre avait été édifiée non pas au VIIIe siècle mais dans la première moitié du Xe siècle, soit environ deux siècles après la mort d'Aubert. Le sanctuaire bâti par l'évêque aurait-il donc été détruit ? Ou ses vestiges n'ont-ils pas encore été localisés par les archéologues ? Des points d'interrogation, toujours.

Outre sa datation exacte, on ignore encore tout de la fonction originelle de Notre-Dame-sous-Terre et de l'environnement dans lequel elle s'insérait. « *Peut-être faisait-elle partie d'un autre ensemble monumental dont il ne reste aujourd'hui plus de traces visibles* », suggère Gaël Carré, qui ajoute avoir dû se faire une raison sur un point : on ne pourra peut-être jamais savoir quelle allure avait le rocher avant l'an mil. « *Le seul moyen de s'en faire à peu près une image est de comprendre comment le complexe monastique s'organisait, s'articulait à cette époque.* »

Un casse-tête chronologique qui se complexifie

La crypte du Xe siècle n'est pas le seul bâtiment à avoir apporté son lot de révélations quant à son âge. Alors que les pèlerinages se multiplient au Mont au début du XIe siècle, comme le montre l'apparition des « *chemins montais* » dans les sources (ce réseau dense d'itinéraires qui menaient au Mont), des travaux sont entamés par l'abbé Hildebert en 1023 pour agrandir l'abbatiale à la mode romane. Dès lors, le casse-tête chronologique se complexifie un peu plus. Les récentes analyses ont démontré qu'il y avait au moins trois phases de construction successives sur l'ensemble du monument religieux : la première au XIe siècle, la deuxième au XIIe siècle, tandis qu'une dernière mouture est venue se greffer au XIIIe siècle. « *En somme, l'abbaye est bien moins homogène qu'on ne le pensait* », complète Mathilde Labatut. Les historiens avaient notamment toujours pensé que la Merveille, partie appuyée sur la pente nord du rocher et qui correspond au cloître, au réfectoire et aux logis (les parties généralement visitées aujourd'hui), avait été construite en une seule fois au XIIIe siècle, entre 1211 et 1228. « *Or, l'archéologie nous a démontré que le joyau gothique était composite. Il aurait été remanié au XIIIe siècle à partir de constructions plus anciennes.* » La partie « sacrée » du rocher n'est pas la seule à poser des énigmes. Il reste encore bien des choses à apprendre sur le village médiéval, traversé aujourd'hui par l'unique rue principale pavée qui conduit le visiteur des remparts à l'abbaye. Ici, les archives attestent de l'existence d'un bourg dès le Xe siècle. « *Un texte rédigé en 1060 fait état d'un incendie qui aurait ravagé une partie des habitations du village en l'an 992,* développe Gaël Carré. *Mais des travaux de voirie menés entre 2015 et 2022 ont démontré la présence d'une activité funéraire dès le VIIIe siècle, époque contemporaine d'Aubert.* » Avec cette découverte se pose là encore l'éter-

EXPERTISE

La datation au carbone 14 confirme l'âge du crâne dit de saint Aubert

Il est une relique aujourd'hui conservée dans l'église Saint-Gervais d'Avranches (Manche) qui a su traverser les siècles sans dommage : le crâne dit de saint Aubert, qui a fait l'objet d'un culte au Mont dès le XIe siècle. Dépourvue de mandibule et percée d'un impressionnant trou, la relique que le temps a rendue brunâtre a fait l'objet en juillet 2019 d'une analyse anthropologique et paléopathologique. Objectif de cette « convocation » sous la lampe des scientifiques : déterminer si le crâne était bien contemporain d'Aubert ou s'il était plutôt une « invention de relique », nom donné à ces ossements récupérés après la Révolution et attribués à des saints. « *La datation au carbone 14 d'un prélèvement dans le rocher temporal nous a permis de conclure que nous avions bien affaire à un Mérovingien* », affirme Cécile Chapelain de Seréville-Niel, archéoanthropologue à l'université de Caen et membre de l'équipe à l'origine du diagnostic, ajoutant que l'individu aurait vécu entre 660 et 770. Et *quid* de son cratère ? « *Nous l'interprétons comme une trépanation chirurgicale à laquelle le sujet aurait survécu durant de longues années.* » Pas de quoi démentir le mythe… mais pas non plus de quoi l'accréditer.

PHOTOPQR/OUEST FRANCE/AUDREY VAIRÉ/MAXPPP

Le crâne perforé, objet de culte depuis le XIe siècle, est attribué à Aubert, évêque fondateur du Mont-Saint-Michel.

SANCTUAIRES

D'autres Mont-Saint-Michel dans le monde

Le Mont-Saint-Michel fut le seul lieu du duché de Normandie que les Anglais ne parvinrent pas à conquérir lors de la guerre de Cent Ans. Mais son lien avec l'outre-Manche ne se résume pas à son caractère irréductible. Le mont normand inspira également au XIe siècle la création d'une imitation anglaise à St Michael's Mount, en Cornouailles, qui devint rapidement un lieu de pèlerinage possédé et géré par les moines du Mont-Saint-Michel à la suite d'un don du demi-frère de Guillaume le Conquérant. Il faudra attendre le règne d'Henri V d'Angleterre (1413-1422) pour que le prieuré repasse aux mains des Anglais et soit finalement relié à l'abbaye de Syon, près de Londres. En réalité, le Mont-Saint-Michel lui-même s'inspire d'un autre lieu, le mont Gargano (aujourd'hui Monte Sant'Angelo) dans les Pouilles, en Italie. Au Ve siècle, l'archange Michel serait apparu en songe à un évêque pour lui révéler qu'une grotte nichée dans cette montagne était sous sa protection. Dès lors, la formation rocheuse fut transformée en sanctuaire et devint un lieu de pèlerinage pour des fidèles venus de France, d'Allemagne et des îles Britanniques. Aubert n'aurait jamais nié cette fraternité entre les deux monts, bien au contraire. Il missionna même deux moines à Gargano pour faire authentifier ses visions par l'abbé du mont italien. Les hommes de foi lui auraient alors rapporté une description précise de la grotte. Saint Michel a définitivement su imposer sa volonté divine dans l'Europe médiévale.

STÉPHANE RIESS / NATURIMAGES

St Michael's Mount, en Cornouailles, a été édifié par les moines du Mont-Saint-Michel au XIIe siècle. sur le modèle normand.

nelle question des origines du Mont : qui étaient ses premiers occupants ? Au cours des siècles suivants, lorsque le caillou devient un haut lieu du christianisme européen, nous savons qu'une intense activité commerciale liée au pèlerinage se développe. En attestent des récits de pèlerins et différents types d'objets retrouvés dans le secteur de la Grand-Rue, comme des moules d'enseignes (de petites « broches souvenirs » en métal prisées par les pèlerins qui les accrochaient à leurs vêtements) à l'effigie de saint Michel. « *Mais nous ne sommes pas si bien renseignés sur ces populations qui occupaient ou visitaient le Mont durant la période médiévale,* nuance Fabien Paquet. *Mis à part des informations ponctuelles, qui nous apprennent, par exemple, qu'une quarantaine de moines habitaient au Mont au milieu du XIIIe siècle. Les études doivent se poursuivre pour dresser leur profil.* »

La suite de l'histoire du Mont, bien que moins mystique, captive tout autant les historiens et archéologues : devenu forteresse durant la guerre de Cent Ans (1337-1453), il est transformé en prison à la fin du XVIIIe siècle. « *Ce sont des périodes qui en disent aussi long sur la vie sur le rocher, et plus largement sur le cours des événements en Europe à travers les époques,* conclut Mathilde Labatut. *Et bien que plus récentes, ces époques ont elles aussi leurs lacunes.* »

On l'aura compris, le Mont-Saint-Michel, connu dans le monde entier, inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco depuis 1979 et gravi quotidiennement par des hordes de touristes, recèle encore bien des secrets. De quoi confirmer l'adage : l'habit ne fait pas le moine. ■

A. BONFILS

« Une quarantaine de moines habitaient au Mont au milieu du XIIIe siècle. Les études doivent se poursuivre pour dresser leur profil »

Fabien Paquet, maître de conférences en histoire médiévale à l'université de Caen Normandie

Ces dinosaures qui venaient du froid

Les découvertes d'ossements de dinosaures se multiplient en Alaska. Les paléontologues tentent de comprendre comment ces animaux ont réussi à s'adapter à cet environnement hostile, marqué par des nuits de plusieurs mois.

En plein hiver polaire, au cœur de l'Alaska, aux États-Unis, *Nanuqsaurus hoglundi*, « lézard ours blanc » en inuit, est parti chasser. Ce dinosaure de la famille des tyrannosauridés, qui mesurait près de 6 mètres de la queue au museau, affronte sans doute les conditions les plus rudes de la Terre de la fin du crétacé, il y a 70 millions d'années : la nuit est tombée depuis plusieurs semaines, une tempête de neige souffle et les proies se font rares. Il s'est pourtant aventuré dans ce milieu hostile et avec lui de nombreux autres dinosaures tels que des hadrosaures à bec de canard, des cératopsiens à cornes ou encore des droméosauridés à l'allure d'oiseaux… Tous sont des résidents permanents de l'Alaska. *« Nous savons qu'ils n'étaient pas simplement de passage puisque nous avons trouvé des traces de nids, d'ossements ainsi que de minuscules dents appartenant à de très jeunes individus de plusieurs espèces différentes »*, raconte Patrick Druckenmiller, paléontologue à l'université de l'Alaska de Fairbanks. Une véritable maternité pour dinosaures découverte dans la formation de Prince Creek, au nord de l'État, à l'été 2021.

Une surprise, car même si *« le climat était plus chaud qu'aujourd'hui, sans calotte glaciaire et avec des températures qui atteignaient 10 ou 15 °C l'été, celles-ci chutaient sous zéro l'hiver. De plus, l'Alaska était alors très proche*

PALEOSTOCK.COM, NATHAN E. ROGERS

« Nanuqsaurus hoglundi », un petit tyrannosaure, vivait en Alaska il y a environ 70 millions d'années (illustration).

du pôle Nord géographique : la nuit polaire aurait été encore plus longue qu'elle ne l'est aujourd'hui », explique François Therrien, du musée royal Tyrrell, en Alberta (Canada). Mais depuis les années 1980, les paléontologues extirpent de nombreux os de cette inhospitalière région, dont certains appartenant à un crâne ont permis de définir l'holotype de *Nanuqsaurus*, en 2014. Et les traces du passage des dinosaures ne se cantonnent pas à l'Arctique canadien. Des empreintes d'ornithopodes vieilles de 120 millions d'années ont été retrouvées sur l'archipel norvégien du Svalbard. En Antarctique, plusieurs fossiles sont également sortis de la glace depuis la première découverte, en 1986, d'*Antarctopelta oliveroi*, un dinosaure à armure qui a vécu au crétacé supérieur. Comment ces animaux, y compris de très gros, ont-ils réussi à s'adapter et à survivre dans ces environnements plus froids et, surtout, marqués par des nuits de plusieurs mois ? En quête de réponses, les scientifiques, avec le renfort de drones et de scanners laser, doivent dénicher des indices désormais cachés sous la glace et accessibles seulement durant les mois les plus cléments de l'été.

Os et dents de plusieurs bébés dinosaures trouvés à Prince Creek, en Alaska (échelle d'un penny de 19 mm de diamètre).

PATRICK DRUCKENMILLER

L'un de leurs objectifs est de comprendre comment *Nanuqsaurus* et ses compères polaires sont arrivés là. L'hypothèse de migrations saisonnières estivales depuis des territoires aux températures plus douces a été invalidée par l'existence de la « maternité » de Prince Creek. De plus, pour l'Amérique du Nord, et en dépit de ressemblances frappantes, ce ne sont pas tout à fait les mêmes espèces retrouvées en Alberta (plus au sud) et en Alaska, *« mais plutôt des cousins très rapprochés »*, précise François Therrien. Qui se demande s'il ne faut pas chercher leur origine, à l'est, en Asie.

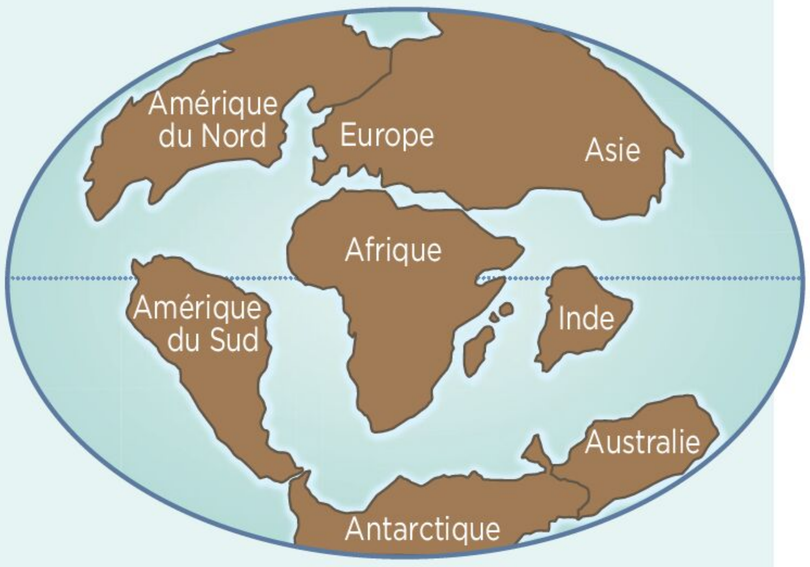
Un détroit de Béring très fréquenté

À la fin du crétacé, les deux continents étaient en effet reliés par une bande de terre au niveau du détroit de Béring et des échanges fauniques entre les deux continents étaient possibles et même documentés. Ainsi, les créatures les plus proches du *T. rex* sont retrouvées en Asie : *« Les ancêtres du* T. rex *ont pu gagner l'Amérique du Nord en passant par le détroit de Béring et s'installer en Alberta et dans tout l'ouest de l'Amérique du Nord. Au passage, un de ces ancêtres s'est sans doute arrêté en Alaska et a évolué pour donner le* Nanuqsaurus », détaille le paléontologue. Un chemin qu'ont aussi emprunté les *Saurolophus*, des dinosaures à bec de canard, qui sont représentés par deux espèces quasi identiques *S. osborni* en Alberta et *S. angustirostris*, en Mongolie. Une route qui a peut-être été parcourue en sens inverse : une seule espèce de grand dinosaure à cornes est ainsi connue en Asie quand tous les autres ont résidé en Amérique du Nord. Et le même mécanisme pourrait expliquer l'établissement de dinosaures en Antarctique, continent qui unissait l'Amérique du Sud à l'Australie *(lire l'encadré ci-contre)*.

HYPOTHÈSE

L'Antarctique, un pont entre l'Amérique du Sud et l'Australie

En avril, un crâne vieux de 95 millions d'années appartenant à un *Diamantinasaurus matildae* a été découvert dans la formation de Winton, au centre de l'Australie. L'animal, un dinosaure au long cou, est considéré comme un titanosaure primitif : il mesurait une quinzaine de mètres de long pour un poids de 15 à 20 tonnes. Son étude a révélé de nombreuses similitudes avec le crâne de *Sarmientosaurus musacchioi*, un titanosaure qui vivait à peu près à la même époque, en Amérique du Sud. Cette corrélation renforce l'hypothèse selon laquelle plusieurs espèces de dinosaures auraient gagné l'Australie depuis ce continent en passant par l'Antarctique. À l'époque, le climat était plus chaud qu'aujourd'hui et l'Australie plus au sud que sa position actuelle, proche de l'Antarctique. Le continent était alors couvert de forêts. Les scientifiques supposent que cette région formait un pont reliant l'Australie et l'Amérique du Sud, que les dinosaures pouvaient emprunter sans grand danger.



Les continents, il y a environ 80 millions d'années.

BRUNO BOURGEOIS

MASATO HATTORI

Les dinosaures à bec de canard étaient l'espèce la plus répandue en Amérique du Nord au crétacé supérieur (illustration).

Comment ces animaux luttaient-ils contre les basses températures ? Sans doute en produisant leur propre chaleur. « *La résidence permanente de dinosaures autour de l'Arctique est un indice fort d'un métabolisme à sang chaud. D'ailleurs, parmi toutes les autres sortes d'espèces retrouvées à Prince Creek il n'y a pas de serpents, de grenouilles ou bien de tortues, autant d'animaux à sang froid pourtant abondants dans des latitudes un peu plus basses* », souligne Patrick Druckenmiller. Pour lui, il s'agit même là de la preuve la plus convaincante de l'endothermie chez les dinosaures de la fin du crétacé. Mais le sang chaud ne suffisait sans doute pas à assurer leur survie l'hiver. Et il est probable qu'ils aient adopté des solutions différentes pour chaque groupe. Pour préserver la chaleur interne, une épaisse couche de graisse sous la peau ou un abondant duvet de plumes font partie des choix toujours privilégiés par les espèces polaires actuelles. Las ! pas de traces de tels attributs dans les rares fossiles retrouvés. Néanmoins, la présence de plumes est documentée chez la plupart des théropodes, hors de l'Arctique, y compris dans la lignée des tyrannosauridés : il n'est donc pas aberrant d'imaginer que *Nanuqsaurus* y ait recouru pour se réchauffer. « *Après tout, j'utilise moi aussi une parka avec des plumes !* », plaisante le chercheur.

Des globes oculaires plus volumineux pour voir la nuit

D'autres stratégies sont aussi évoquées comme l'hibernation, « *qui peut être envisagée pour les plus petites espèces qui pesaient moins de 100 kg* », estime François Therrien. Dans le Montana (États-Unis), la découverte de tanières souterraines suggère que ce comportement a pu être adopté par des dinosaures proches des *Oryctodromeus* (de petits ornithopodes), mais aucun abri similaire n'a encore été retrouvé plus au nord. Quant aux plus gros dinosaures, herbivores, ils disposaient toujours de ressources alimentaires, puisque la végétation d'alors se composait essentiellement de gymnospermes et de fougères à feuilles persistantes. L'examen, en cours, des anneaux de croissance de plusieurs os fossilisés permettra de mieux comprendre le rythme de croissance de ces dinosaures polaires tout au long d'une année, et certainement de constater un ralentissement hivernal.

Enfin, reste la question de l'interminable nuit : pour mieux y voir, il faut de grands yeux ! Un grand nombre de dents appartenant au Troodon, un petit théropode avec de très gros globes oculaires, ont été mises au jour en Alaska. Et, de l'autre côté de la Terre, *Leaellynasaura amicagraphica*, un ornithopode de petite taille, qui vivait il y a 115 millions d'années dans le sud-est de l'Australie, possédait la même caractéristique. Mieux : les paléontologues ont même pu étudier le moulage de sa boîte crânienne et constater que ses lobes optiques étaient plus volumineux que ceux de ces cousins vivant hors du cercle polaire. Mais on ignore encore si *Nanuqsaurus* était doté d'une vision améliorée. Elle lui aurait été bien utile pour ne pas rentrer bredouille de sa chasse quotidienne. ■ **Joël Ignasse**

GREG ERIKSON

« La résidence permanente de dinosaures autour de l'Arctique est un indice fort d'un métabolisme à sang chaud »

Patrick Druckenmiller, paléontologue à l'université de l'Alaska de Fairbanks (États-Unis)

Cinq questions pour lever les freins à la voiture électrique

Le système d'échange de batterie, développé par le chinois Nio, permet au véhicule de récupérer 100 % d'autonomie en moins de cinq minutes.

NIO

L'autonomie et la recharge sont les deux principaux verrous technologiques qui pèsent sur la voiture électrique. Mais les solutions existent et certaines sont même déjà au stade de la commercialisation.

Par Mathieu Chevalier, avec Agence Forum News

1 À quand 1000 km d'autonomie ?

Ce sont les marques chinoises qui ont, les premières, avancé ce chiffre mirobolant. GAC, tout d'abord, avec l'Aion LX Plus équipée d'une batterie de 144 kWh au graphène. Ce matériau est un dérivé du graphite, lui-même issu du carbone. Encore cher, il présente malgré tout de gros avantages : charge rapide (les électrons circulent 100 fois plus vite que dans le silicium d'une batterie lithium-ion) et gains en poids et volume. Zeekr, ensuite, avec la 001 qui innove par l'intégration de sa batterie 140 kWh, dont les cellules sont directement dans le châssis. Cela permet de gagner en poids (les batteries n'ont plus besoin de structure propre) et en quantité de cellules (positionnement optimisé dès la conception du châssis). Attention cependant, l'autonomie de la GAC a été mesurée selon l'ancien protocole NEDC et celle de la Zeekr selon la norme chinoise CLTC. Des cycles plus optimistes que le WLTC appliqué en Europe, ce dernier étant lui-même plus optimiste que les conditions réelles de roulage…

2 Pourrait-on simplement changer de batterie ?

Le principe de *battery swap* (échange de batterie) est défendu par le constructeur chinois Nio, qui a déployé plus de 1300 stations d'échange dans son pays d'origine et s'apprête à en ouvrir en Europe. Le principe est simple : la voiture entre dans une station d'échange en forme de gros conteneur ; elle se positionne sur la plateforme et un système robotisé remplace la batterie vide par une pleine. L'échange ne prend pas plus de 5 minutes, contre 25 minutes de charge sur une borne rapide (de 10 à 80 % de la batterie). Sur les plus grosses stations déjà installées dans les mégalopoles chinoises, dont Shanghai, la capacité d'échange constatée atteint les 150 par jour. Ce système souffre pour le moment d'une absence de standardisation des packs de batteries entre les marques, et de la lourde mise en place des stations qui demandent un investissement initial bien supérieur aux bornes.

3 La recharge va-t-elle s'accélérer ?

La vitesse de recharge dépend de plusieurs facteurs, à commencer par la puissance de la borne. En France, c'est Tesla qui avance la valeur la plus élevée avec 250 kW (pour rappel, puissance en watts = tension en volts × intensité en ampères) sur ses superchargeurs V3, et bientôt 350 kW sur les V4. Mais ce sont les marques chinoises qui sont encore les mieux-disantes : Nio a annoncé une

LES INDISPENSABLES

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

VIRGINIE COURTIER-ORGOGOZO
Biologiste, professeure au Collège de France

« Nous sommes l'extrémité d'une chaîne qui vit depuis des milliards d'années »

Les mystères du VIVANT

L'étonnant langage des cellules

Ces espèces adaptées aux milieux extrêmes

Comment la vie est apparue sur Terre

Des « mini-cerveaux » fabriqués en labo

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR ; GETTY IMAGES

en vente en kiosque

AVIS D'EXPERT

GILLES MOREAU, COFONDATEUR DE VERKOR *

« Le recyclage des batteries est une solution aux problèmes d'approvisionnement »

Quels sont les problèmes pesant sur les matériaux « stratégiques » d'une batterie ?
La fabrication d'une batterie nécessite l'utilisation de cinq métaux qui peuvent, pour des raisons diverses, être en tension : le nickel, le cobalt, le cuivre, le graphite et le lithium. Différents enjeux pèsent sur ces matières premières, que ce soit en matière de disponibilité du stock (cuivre et nickel), de maturité de la chaîne d'approvisionnement (lithium et nickel) ou d'accès à la ressource (70 % du cobalt est produit au Congo, 80 % des métaux sont raffinés en Chine). Enfin, les enjeux sociaux, notamment le travail des enfants dans les mines et le travail forcé, constituent une préoccupation majeure.

Quelles pistes pour résoudre ces difficultés ?
Les recherches s'orientent sur le développement de technologies qui se passent de ces matériaux. Lorsque cela n'est pas possible, on travaille avec des fournisseurs capables de garantir un approvisionnement responsable. Nous faisons appel à des partenaires tels que Bureau Veritas ou Optel pour évaluer les risques sociaux et environnementaux. Enfin, il est possible de relocaliser certaines étapes de la chaîne d'approvisionnement, comme pour le lithium.

Quid du recyclage ?
C'est à terme une bonne solution : les métaux utilisés dans la batterie sont toujours présents à 100 % à la fin de vie du véhicule et peuvent donc être récupérés. Et sur les 400 kg de matériaux qui constituent la batterie, plus de 90 % peuvent être recyclés. ■

Propos recueillis par M. C.

* Fabricant français de batteries.

PICT YOUR COMPANY

- borne capable d'atteindre une puissance de 500 kW, alors que le groupe Geely (Volvo, Smart, Zeekr) table sur 600 kW. Cela permettrait de recharger une batterie (de 10 à 80 %) en 12 minutes, contre 25 minutes pour les meilleurs modèles actuels. Mais augmenter la puissance d'une borne entraîne une intensité élevée qui fait peser des contraintes (risques de surchauffe, voire d'incendie) sur les câbles et les batteries. Une solution consiste à augmenter la tension et réduire l'intensité. Mais les modèles dotés d'un système 800 volts sont encore rares, la plupart fonctionnant en 400 V. Il est aussi possible de travailler sur le refroidissement : grâce à une technologie spatiale, la Nasa a développé un chargeur capable de délivrer 1400 ampères sans surchauffe du câble. Une telle valeur permettrait de recharger une batterie en… 5 minutes.

4 La charge par induction est-elle réaliste ?

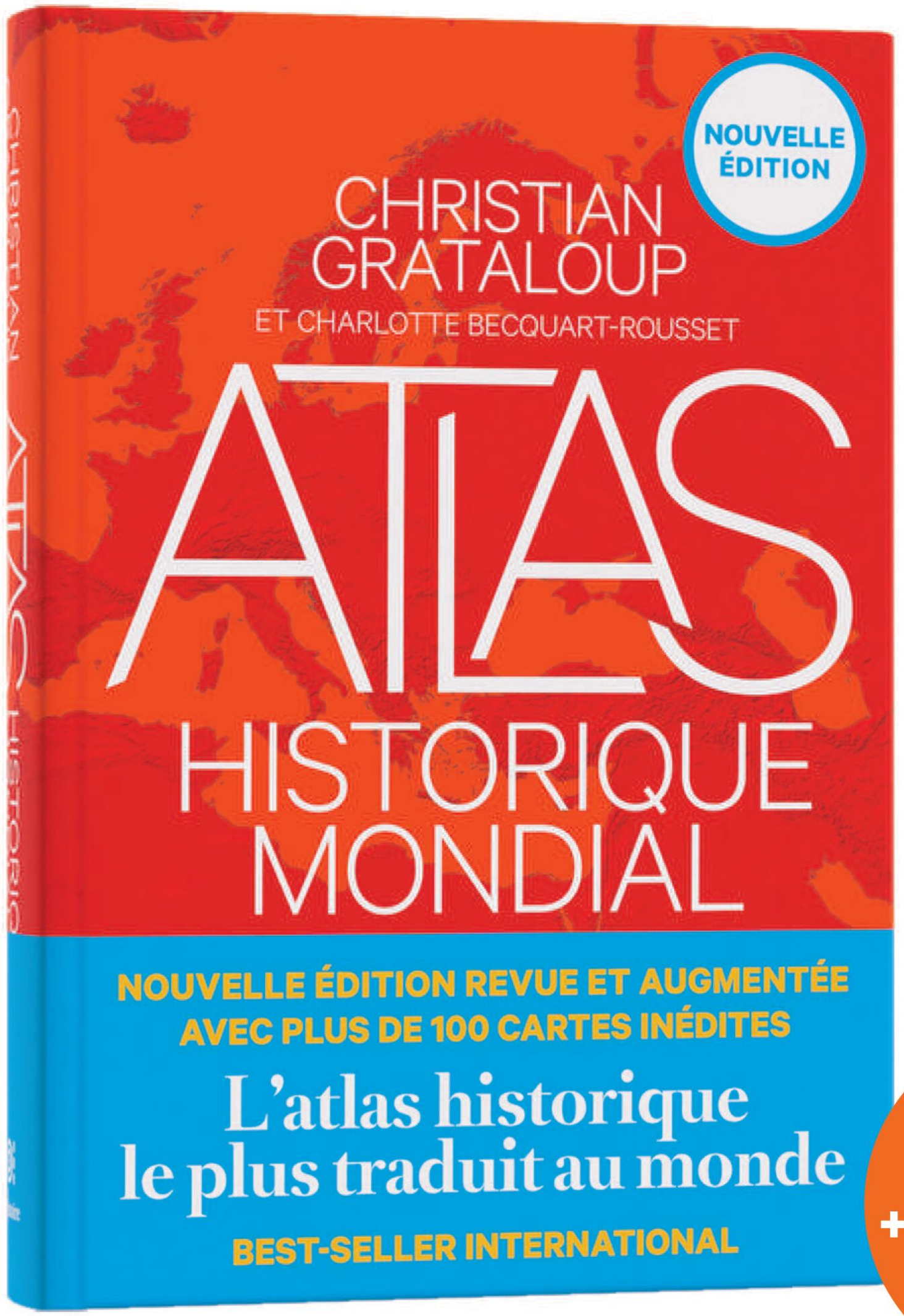
Plus de câble ici, la recharge se fait grâce à un champ électromagnétique entre une bobine située dans le sol et une sous la voiture. Tous les constructeurs travaillent sur une telle solution et en particulier Tesla qui, lors du dernier « Investor day », a laissé apercevoir un tel système au détour d'une photo… Cette technologie a deux inconvénients : sa puissance limitée (20 kW aujourd'hui) et les fortes déperditions (plus de 20 %). Mais l'université de Chalmers, en Suède, a annoncé avoir mis au point un dispositif pouvant atteindre 500 kW, tout en réduisant les pertes à moins de 3 %. Des résultats obtenus grâce à l'utilisation de carbure de silicium pour les semi-conducteurs, matériau déjà utilisé, en 2019, par l'Oak Ridge National Laboratory, aux États-Unis, pour faire fonctionner un système de 120 kW. À terme, cette solution pourrait être intégrée dans le revêtement routier, ce qui permettrait aux voitures électriques de se recharger en roulant.

5 L'hydrogène est-il la solution ?

La voiture à hydrogène ne stocke pas l'électricité mais la produit à bord. Cela présente plusieurs avantages : le plein ne prend pas plus de temps qu'un plein d'essence, l'autonomie offerte est équivalente et la transformation de l'hydrogène en énergie ne dégage que de l'eau. Mais trois freins pénalisent encore cette technologie. Le premier est le coût induit par une pile à combustible (qui transforme l'hydrogène en énergie) et le réservoir d'hydrogène (capable de supporter des pressions de 700 bars). La berline Toyota Mirai s'affiche à 71 500 euros et le SUV Hyundai Nexo à 80 600 euros ! Le défi de la distribution est également complexe et seules une vingtaine de stations sont accessibles au grand public. Enfin, il faut que la production d'hydrogène soit neutre en carbone. On parle d'hydrogène « vert » lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau et que cette opération n'utilise que de l'électricité renouvelable. Cela a un prix : l'hydrogène « vert » coûte environ 5 euros /kg contre 1,50 euro/kg pour le « gris », selon le spécialiste BloombergNEF. Mais ce prix devrait diminuer grâce à la multiplication des équipements d'électrolyse, la baisse du prix de l'électricité zéro carbone et le soutien des États. ■

«On ne peut pas comprendre le monde sans le voir.»

Erik Orsenna
de l'Académie française



«Une indispensable synthèse cartographique de l'histoire du monde.»
Le Monde

Une création originale L'Histoire Les Arènes

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

RONALD GRANT ARCHIVE/MARY EVANS PICTURE LIBRARY / PHOTONONSTOP

Le comte Dracula (ici interprété en 1958 par Christopher Lee) est le plus mythique des vampires.

Toute la lumière sur les vampires

Le médecin légiste et archéoanthropologue Philippe Charlier présente une somme écrite au XVIIIe siècle par un érudit bénédictin sur les revenants buveurs de sang à l'aune de ses connaissances scientifiques.

FANTASMAGORIES

« Chaque époque avait sa maladie superstitieuse, la nôtre avait celle des vampires. » Telle est la citation qui ouvre le dernier « cas d'étude » de Philippe Charlier, médecin légiste, archéologue et anthropologue hyperactif qui vient ici, avec les vampires, compléter la liste des créatures de l'ombre qu'il se plaît depuis de nombreuses années à étudier (fantômes et zombies ou momies sont déjà à son palmarès). La phrase n'est pas de lui, mais de Dom Augustin Calmet, érudit bénédictin du XVIIIe siècle dont les travaux sur les revenants buveurs de sang sont au cœur de cet ouvrage. Dans un siècle des Lumières où la croyance dans les vampires est largement répandue, Dom Calmet se met en tête de compiler tous les rapports disponibles au sujet de leurs manifestations face aux vivants. Avec ce travail colossal, qu'il réalise dans la dernière partie de sa longue vie (il meurt à 85 ans dans son abbaye de Senones, dans les Vosges), il se fixe pour objectif de répondre à un certain nombre de questions incontestablement audacieuses pour un homme d'Église : les vampires existent-ils ? Quelle valeur accorder aux nombreux récits venus du fin fond de l'Europe de l'Est ? Dans ce *Traité sur les apparitions et les vampires*, Philippe Charlier apporte l'appareil scientifique qui manquait à l'une des premières tentatives d'élaboration d'un rationalisme chrétien avec lequel Voltaire lui-même ne sera pas tendre. Et rappelle *« combien la modernité ne peut être résumée au passage de l'ombre à la lumière »*. ■

Marine Benoit

Le Traité sur les apparitions et les vampires de Dom Calmet, présenté et édité par Philippe Charlier, Cerf, 392 p., 22 €

Les dessous de l'exploration spatiale

ENQUÊTE C'est un fabuleux voyage d'un bout à l'autre du Système solaire que propose cet ouvrage écrit dans un style vivant et plein d'humour. Il détaille l'état actuel des connaissances, les grandes questions en suspens.
Mais livre aussi un intéressant témoignage sur la manière dont les missions d'exploration spatiale sont conçues, faites, avant tout, *« d'exigence, de prise de risque — mais aussi de possibles déceptions, de beaucoup de compétition »*, souligne l'auteure, astrophysicienne à l'observatoire de Paris. **F. D.**

En quête de planètes : explorer le Système solaire, Léa Griton-Noël, Quanto, 246 p., 22 €

Renouveler l'analyse du fait colonial

ÉCLAIRAGE Cette somme, qui réunit les contributions de plus de 200 historiens, anthropologues, sociologues, juriste et autres chercheurs. du monde entier, retrace l'histoire de l'empire français et de ses héritages depuis l'époque

contemporaine jusqu'aux sociétés asiatiques, maghrébines, africaines, caribéennes et océaniennes qui existaient bien avant la domination coloniale. Un voyage *« en remontant le fleuve du temps »* qui offre un éclairage neuf, résolument moderne, à une problématique complexe, longtemps négligée. **V. G.**

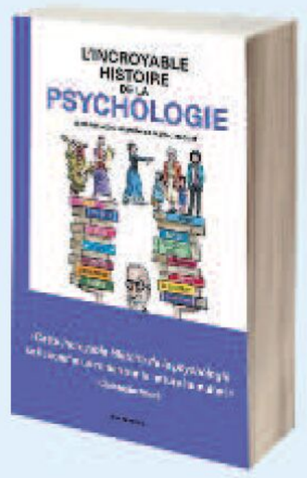
Colonisations. Notre histoire, Pierre Singaravélou (dir.), Seuil, 940 p., 35 €

La mécanique du sur-place

INVENTION C'est en janvier 1859 qu'est déposé, en France, le brevet d'un « manège à tablier sans fin », soit un

plancher mobile qu'un animal est chargé de *« faire fuir sous ses pas »*. Bref : un tapis roulant. Ce livre fascinant explore l'évolution de cette innovation qui va façonner le monde moderne. Dans l'industrie, l'agriculture, l'urbanisme, les loisirs… Les détails techniques fourmillent, des usages insoupçonnés se succèdent. Pour une lecture qu'on souhaiterait sans fin. Comme un tapis roulant. **A. D.**

Les Chaînes sans fin, histoire illustrée du tapis roulant, Yves Pagès, La Découverte, 240 p., 20 €



La psychologie sans tabou

BD Détrompez-vous : la psychologie n'est pas une invention de la modernité, elle est née avec les humains, dotés d'une tenace propension à se poser des questions sur leur propre fonctionnement émotionnel et celui de leurs semblables. Dans cette BD dense et intrigante, l'avatar dessiné du psychologue et historien Jean-François Marmion joue le rôle de guide. Dans les circonvolutions d'un récit qui démarre avec les chamans et aboutit aux recherches des neurosciences, il décrypte avec humour découvertes, faux pas retentissants et joutes qui jalonnent l'évolution de cette discipline. Magnétisme, spiritisme, hypnose, hystérie… avènement du subconscient, entrée en scène de Sigmund Freud et de Carl G. Jung, puis des thérapies comportementales, ascension de la psychanalyse, toute-puissance de Jacques Lacan, classifications psychiatriques ! Tout cela en planches, strips et vignettes qui relèvent — haut le crayon — le défi de la pédagogie et de l'analyse. ■ **Andreina De Bei**

L'Incroyable Histoire de la psychologie, Jean-François Marmion et Pascal Magnat, Les Arènes, 272 p., 24 €

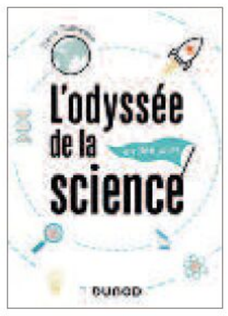
Instantanés de vies animales

COMPORTEMENTS Qu'est-ce que le propre de l'homme ? Le rire, selon Aristote, une idée popularisée par François Rabelais dans *Gargantua* (1534). Dans cet ouvrage, François Verheggen, zoologiste de l'université de Liège (Belgique), s'interroge à son tour sur notre particularité à l'heure où de nombreuses études d'éthologie découvrent l'extraordinaire complexité des comportements animaux. En 15 récits s'appuyant sur des publications scientifiques, il démontre ainsi que nous n'avons pas l'apanage du rire, de la fabrication d'outil, de l'enseignement, de l'agriculture, de l'art, du deuil, de la vengeance, de la politique ou de la guerre. Ces contes illustrés nous plongent dans des instantanés de la vie de fourmis cultivatrices de champignons, de rennes addicts aux substances psychotropes, de papas mangoustes paresseux, de tout petits poissons sculpteurs capables de créer des fresques de sable de plus de deux mètres de diamètre… À la fin de chaque récit, l'auteur réfléchit à la particularité de l'humain à l'aune de ces découvertes. Un ouvrage absolument passionnant. ■ **Sylvie Rouat**

La Cigale et le Zombie, François Verheggen et Stéphane Deprée (illustrations), Delachaux et Niestlé, 144 p., 19,90 €

La science en dates

ÉPHÉMÉRIDE Savez-vous pourquoi le 10 avril 2019 est une date importante dans l'histoire de l'astrophysique ? Et le 20 janvier 1665 dans celle de la biologie ? La réponse se trouve dans ce livre. Après avoir étudié et recoupé une foultitude de documents historiques, l'auteur, historien



des sciences au CNRS, a établi un calendrier de 366 dates — une par jour de l'année ; chacune d'elles met en avant une découverte ou un(e) savant(e) qui, en physique, chimie, informatique ou encore mathématiques, a bouleversé notre compréhension du monde. Un livre qu'on picore avec plaisir. **V. G.**

L'Odyssée de la science en 366 jours, Denis Guthleben, Dunod, 384 p., 16,90 €

C'EST À VOIR

EXPOSITIONS

Annecy (74)

Ciels
Conçue pour les 3-6 ans, cette exposition joue sur la fascination des enfants pour le ciel. En six îlots ludiques, le parcours explore le rapport entre ciel et comportement, émotions, imaginaire, observation, exploration et création.
La Turbine Sciences, place Chorus, Cran-Gevrier, jusqu'au 3 mars 2024. Rens. : 04.85.46.74.30.

Fontainebleau (77)

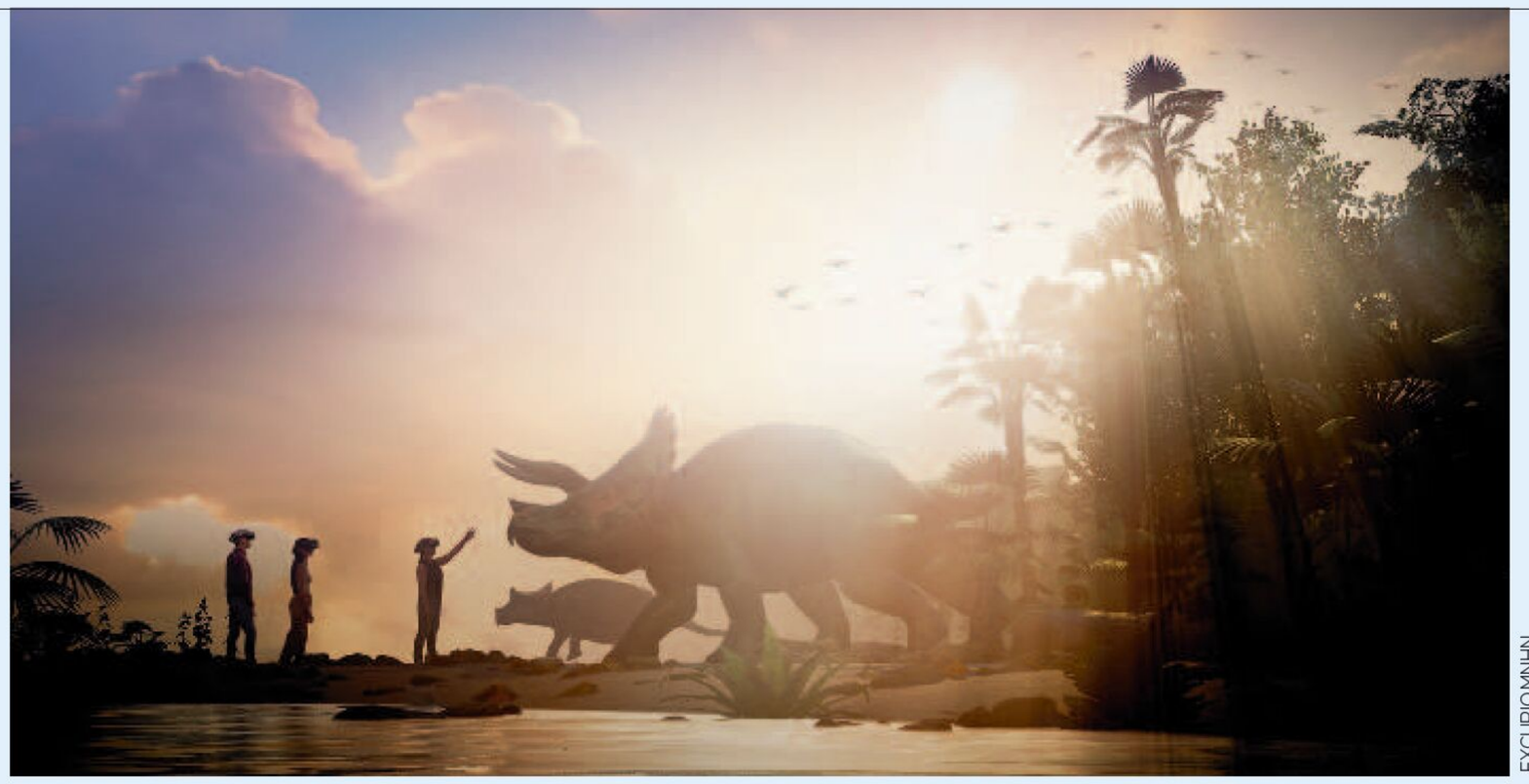
Fontainebleau, portraits d'un château
L'évolution du château au fil des siècles est montrée au travers de 250 dessins, aquarelles, estampes, issus des collections du lieu. Les conventions en vigueur et les usages sont abordés par le biais de documents.
Château de Fontainebleau, place Charles-de-Gaulle, jusqu'au 4 mars 2024. Rens. : www.chateaudefontainebleau.fr

Fontevraud-l'Abbaye (49)

Une folle histoire du temps
Cette abbaye du XIIe siècle, devenue une prison sous Napoléon Ier, propose d'explorer la notion de temps. Perception individuelle et dimensions culturelles côtoient les aspects les plus scientifiques, le temps étant un sujet d'étude lié à l'infiniment grand et l'infiniment petit.
Abbaye de Fontevraud, 38, rue Saint-Jean-de-l'Habit, jusqu'au 22 septembre 2025. Rens. : sciav.fr/921fontevraud

Lyon (69)

Terra incognita, rendez-vous au bout du monde
Le réalisateur Luc Jacquet partage sa fascination pour l'Antarctique dans un parcours simulant un voyage de la Patagonie au pôle Sud. Projections sur quatre écrans et ambiances sonores créent une atmosphère immersive.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 3 mars 2024. Rens. : 04.28.38.12.12.


EXCURIO MNHN

Paris (75) / Expérience immersive

Mondes disparus

Difficile, en 2023, de se retrouver dans le système reproducteur d'un ichtyosaure, reptile aquatique du jurassique, soit entre 201 et 145 millions d'années avant notre ère. Mais c'est l'un des moments forts de cette expérience de réalité virtuelle du Muséum national d'histoire naturelle. Huit époques de l'histoire de la Terre dévoilent les formes de vie et les paysages correspondants. « *Tous les tableaux ont des enjeux pédagogiques travaillés avec le Muséum,* explique Fabien Barati, dirigeant fondateur du studio Emissive qui a développé cet environnement. *On découvre les reptiles marins géants, on est téléporté au crétacé face à un nid de Dakotaraptors. À l'éocène, on monte dans la canopée pour découvrir les premiers primates dotés d'un pouce opposable.* » Le visiteur arpente une salle de 500 m², guidé par des astuces visuelles. Une trentaine de scientifiques ont collaboré au projet. Autant dire que, si le résultat est impressionnant, le visiteur est bien au Muséum, pas dans *Jurassic Park.* ■

Arnaud Devillard
Galerie de géologie du Muséum national d'histoire naturelle, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, jusqu'au 16 juin 2024. Rens. : sciav.fr/921mondes

Nantes (44)

Gengis Khan, comment les Mongols ont changé le monde
Cette exposition raconte comment les armées mongoles ont bâti, au XIIIe siècle, un empire correspondant à 22 % des terres du globe.
Château des ducs de Bretagne, musée d'Histoire de Nantes, 4 place Marc-Elder, jusqu'au 5 mars 2024. Rens. : 08.11.46.46.44.

Paris (75)

Maison Poincaré
C'est le premier lieu en France entièrement consacré aux mathématiques. Il est aménagé dans l'ancien laboratoire de Jean Perrin. Tout a été pensé pour le grand public, avec des dispositifs interactifs, des objets de collection et des manipulations.
Institut Henri-Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie Curie. Rens. : sciav.fr/921poincare

Océans, l'odyssée immersive
Le lieu immersif présente les photographies sous-marines de l'Américain Brian Skerry, collaborateur de *National Geographic* depuis 1998. Les vues époustouflantes de la faune et du paysage vont des mers du Sud aux fonds marins polaires, célébrant la beauté d'espaces fragiles.
Atelier des Lumières, 38, rue Saint-Maur, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : 01.80.98.46.00.

Villeneuve-d'Ascq (59)

Léonard de Vinci à la croisée des arts et des sciences
L'héritage de Léonard de Vinci va de la peinture à l'architecture en passant par l'anatomie ou l'ingénierie. Cette pluridisciplinarité est à l'honneur au travers de reproductions d'œuvres et d'inventions.
Forum départemental des sciences, 1, place de l'Hôtel-de-Ville, jusqu'au 25 août 2024. Rens. : 03.59.73.96.00.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL DE NOVEMBRE

PAR JOHAN KIEKEN

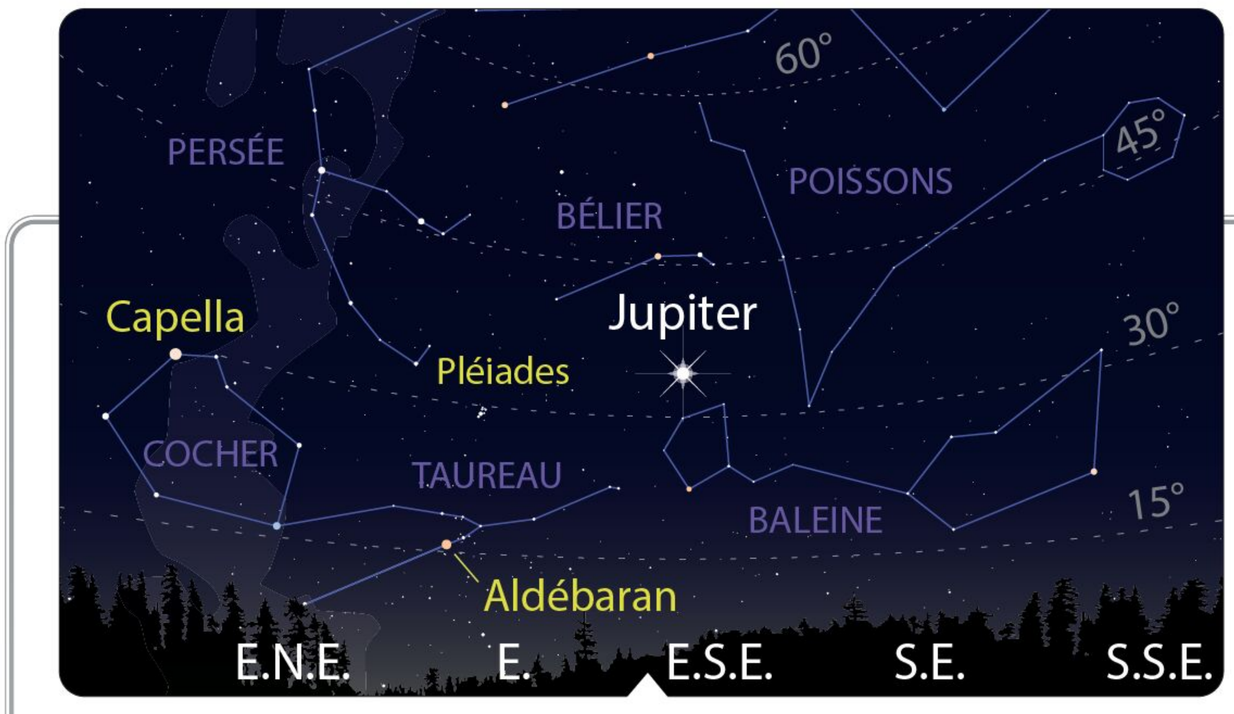
Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète n'est pas observable en novembre sous nos latitudes, trop basse vers le couchant en soirée.

VÉNUS L'étoile du Berger se trouve toujours dans de très bonnes conditions d'observation. Visible en fin de nuit et le matin, elle se lève environ 4 h avant le Soleil. Étincelante, elle quitte le Lion le 2 et entre alors dans la constellation de la Vierge.

MARS La planète Rouge passe en conjonction avec le Soleil le 18. Elle n'est pas observable ce mois et nous ne la retrouverons dans le ciel du matin qu'en 2024.

JUPITER La planète géante passe à l'opposition le 3 *(lire ci-contre)*. La période est idéale pour l'observer à l'aide d'un instrument d'optique qui vous dévoilera son atmosphère turbulente et colorée ainsi que la célèbre Grande Tache rouge, un gigantesque anticyclone qui pourrait contenir deux planètes comme la Terre.



Aspect du ciel vers 21 heures. Jupiter a commencé sa lente ascension et atteindra sa hauteur maximale un peu après minuit, dans la direction du sud.

Jupiter en majesté

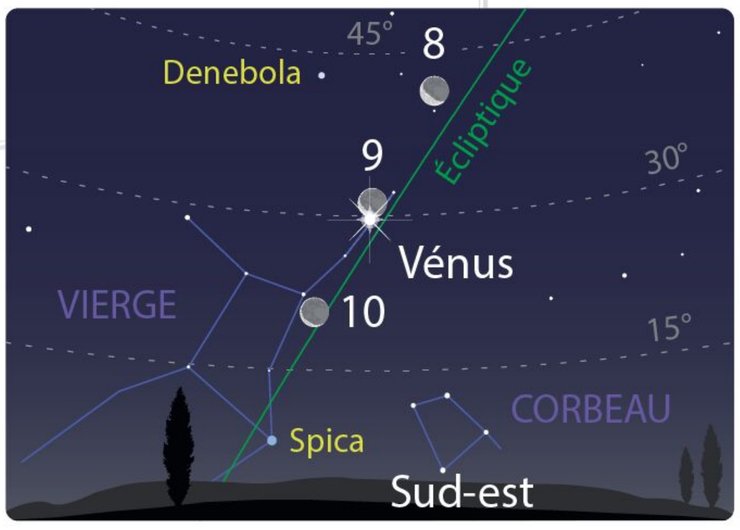
LE 3, DANS LA CONSTELLATION DU BÉLIER, Jupiter passe à l'opposition. La planète géante et le Soleil se situent alors dans des directions opposées. Jupiter se trouve donc dans les meilleures conditions d'observation possibles ce mois. Se levant au moment où le Soleil se couche et restant visible toute la nuit, elle culmine à près de 60° de hauteur au cœur de la nuit. Son éclat domine largement celui des astres environnants.

Notre conseil Braquez sur la planète une simple paire de jumelles : vous décèlerez ses quatre plus gros satellites.

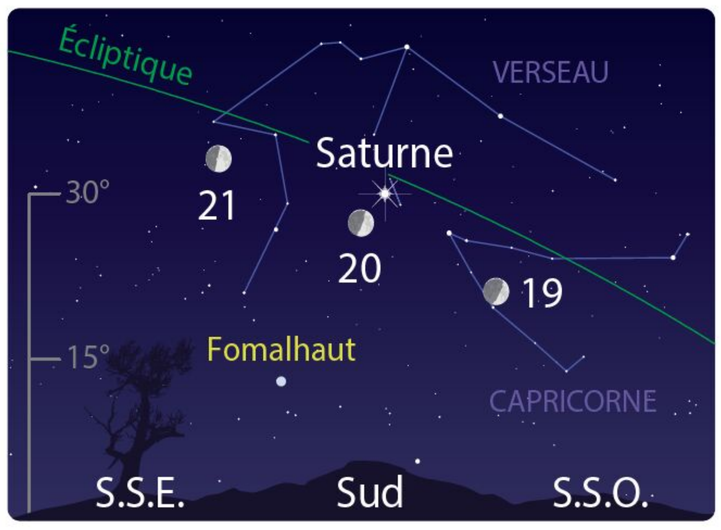
SATURNE La planète aux anneaux est déjà proche de sa culmination lorsque la nuit tombe. En soirée, vous la verrez à une trentaine de degrés de hauteur, vers le sud. Elle entame ensuite sa lente descente vers l'ouest et passe sous l'horizon en milieu de nuit.

L'appli du mois

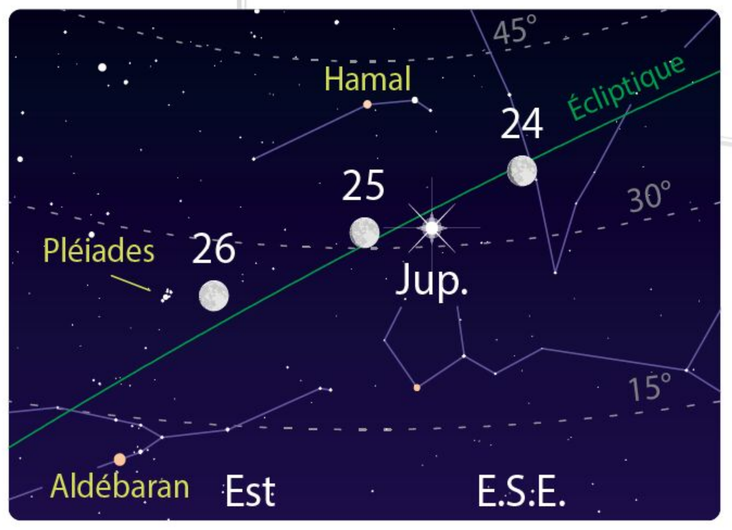
REDSHIFT SKY PRO est une application payante (9,99 euros) en français pour Android et iOS. Prisée des amateurs, c'est à la fois une base de données astronomiques fréquemment mise à jour et un planétarium de poche très complet qui, moyennant un abonnement annuel, peut prendre le contrôle de la monture de votre télescope.



LE 9, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune en dernier croissant ne se trouvera qu'à un peu plus de 1° de la planète Vénus. Un très beau rapprochement à ne pas manquer !



DU 19 AU 21, LE PREMIER QUARTIER DE LUNE passera au large de la planète Saturne. C'est le 20 qu'elle en sera au plus près, à 3°. Il est ici 2 h après le coucher du Soleil.



LE 25, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune presque pleine se situera à moins de 6° de Jupiter. Elle constituera toutefois une intense source de pollution lumineuse.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de novembre

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Capture et stockage de CO_2 : promesses et mirages

Les débats deviennent de plus en plus âpres sur la sortie des énergies fossiles et pour s'y opposer, certains cherchent à faire croire que le développement de technologies de capture et stockage du CO_2 (CSC) permettra de l'éviter. La recherche et le développement de telles technologies peuvent à terme jouer un rôle dans l'obtention de zéro émission nette de CO_2, objectif incontournable pour stabiliser le réchauffement global et stopper l'aggravation des impacts associés. Pour contrebalancer les émissions résiduelles dans les secteurs les plus difficiles à décarboner, des absorptions de CO_2 seront en effet nécessaires dans un monde neutre en carbone. Pour autant, le rôle de ces absorptions reste limité, et elles ne peuvent en aucun cas se substituer à une réduction importante de l'usage des énergies fossiles. Après l'examen de l'ensemble des trajectoires d'atténuation compatibles avec la limitation du réchauffement global sous 2 °C qui lui ont été soumises, ainsi que de la littérature scientifique disponible, le Giec a conclu que *« si l'on ne parvient pas à réduire la consommation mondiale de combustibles fossiles en dessous des niveaux actuels d'ici à 2030, il sera plus problématique de limiter le réchauffement à moins de 2 °C »*. La nécessité de capture et stockage du CO_2 dans un monde à zéro émission nette de CO_2 ne doit pas nous détourner de la trajectoire qui repose avant tout sur la réduction immédiate, rapide et durable des émissions brutes de CO_2. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHÉMATIQUES PAR SYLVIE BENZONI

Pour un serment d'Hippocrate en mathématiques

Si éthique rime avec mathématiques, les associer ne va pas de soi pour celles et ceux qui les pratiquent. L'extraordinaire et presque centenaire mathématicien Jean-Pierre Serre l'affirmait tout de go en 2015 : *« En mathématique, l'éthique ne pose pas de problème. »* Vraiment ? Ce n'est pas l'avis du mathématicien Maurice Chiodo, porteur d'un projet de recherche sur l'éthique en mathématiques. Car le rôle des mathématiques dans la crise financière de 2008 ou dans les dérives de l'intelligence artificielle est indéniable, et l'on peut imaginer d'autres usages à des fins dommageables. Que devrions-nous faire, par exemple, de la découverte d'un algorithme rapide de factorisation des nombres entiers, qui ruinerait le principe de base de toutes les communications cryptées ? Chiodo déplore que la communauté mathématique ne se sente pas plus concernée par l'impact de notre science sur la société. Lorsque la philosophe Marlène Jouan a entrepris de s'intéresser à la question, elle a été elle-même surprise. Depuis, elle fait la tournée des laboratoires de mathématiques pour exposer le fruit de ses recherches sur ce thème émergent. L'idée a été avancée d'un « serment d'Hippocrate » pour les mathématiques et les sciences du numérique. Quoi qu'il en soit, la meilleure façon d'éviter un mésusage des mathématiques est que notre communauté y réfléchisse elle-même. Il serait temps ! ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Commisération contre vie privée : l'insoluble aporie

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

La protection des données personnelles s'impose. Personne n'en disconvient, surtout à l'heure où l'exposition de notre vie privée sur les réseaux risque, à tout moment, de nous livrer en pâture au tribunal de l'opinion, sans défense, ni recours. Il en va de nos libertés d'agir, d'aller et venir, de nous exprimer, de nous réunir, de penser, etc. Il importe tout autant de venir en assistance aux plus démunis et à tous ceux que le sort désavantage.

La charité envers ceux qui se trouvent dans le besoin apparaît comme un devoir moral depuis la plus haute antiquité, et plus encore avec le judaïsme et le christianisme.

Et, désormais, ce n'est plus seulement une obligation individuelle que de secourir ses proches. La collectivité souhaite procurer à chacun les moyens de poursuivre une existence digne. Les lois le garantissent. Toute une panoplie de mesures existe pour cela : bouclier social, accompagnement des personnes dans le besoin, assistance médicale gratuite, etc. Or, l'expérience montre que les plus modestes, du fait de leur ignorance et de leur humilité, du fait aussi de la complexité des procédures, n'y font pas souvent appel, car ils n'en ont pas une connaissance suffisante. Il leur arrive alors de vivre mal et de se mettre dans des situations sanitaires très difficiles, faute d'avoir recouru à temps aux aides auxquelles ils avaient droit et aux soins dont ils auraient eu besoin. On pourrait repérer les personnes les plus vulnérables afin de leur signifier leurs droits. Grâce aux progrès de l'informatique, la chose est devenue techniquement possible, au moins pour les retraités. À cet effet, il conviendrait d'avoir accès aux revenus et à la situation familiale de chacun. Or, la législation sur les données personnelles l'empêche. Pour assurer les libertés individuelles, les lois sur la protection de la vie privée visent à un aveuglement volontaire, ce qui conduit à une invisibilisation de la situation des personnes, en particulier des plus démunies, et, par là, à une absence de miséricorde… ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

La Commission européenne propose de reconduire pour dix ans l'autorisation du glyphosate dans l'Union ; à charge ensuite pour chaque pays de valider ou non les produits contenant cette substance active — dont le fameux Roundup de Monsanto — en fixant leurs règles d'utilisation. Cette décision, controversée, s'appuie sur un avis de l'Autorité européenne de sécurité des aliments : elle a indiqué ne pas avoir identifié de *« domaine de préoccupation critique »* chez les humains, les animaux et l'environnement justifiant d'empêcher l'autorisation du glyphosate. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIOLOGIE

Quelle différence entre vrais et faux jumeaux ?

Zina D.

La conception des vrais jumeaux (monozygotes) se produit lorsque, après la fécondation, l'ovule fécondé (appelé zygote) se divise en deux. Si chaque zygote peut développer son propre sac amniotique et son propre placenta, il partage le même matériel génétique que son jumeau. Par conséquent, les vrais jumeaux sont du même sexe et ont une apparence presque identique. Quant aux faux jumeaux (dizygotes), ils résultent de la fécondation de deux ovules distincts par deux spermatozoïdes différents. Chaque jumeau a donc ses propres placenta et sac amniotique, et possède un ensemble de gènes différent. Les faux jumeaux peuvent donc être de sexes différents et ne se ressemblent pas plus que des frères et sœurs nés à des moments différents. ■ **Matéo Da Ponte**

PHYSIQUE

Pourquoi le ciel est-il bleu ?

Hala M.

Le Soleil nous envoie une lumière blanche qui est en réalité composée de toutes les couleurs. Lorsqu'elle entre dans l'atmosphère terrestre, les molécules de celle-ci la dispersent dans toutes les directions. La dispersion n'est pas la même selon les couleurs : à chacune d'elles correspond en effet une longueur d'onde. Plus cette dernière est courte — c'est le cas du bleu et du violet —, plus la couleur est dispersée dans le ciel. L'œil humain étant peu sensible au violet, c'est le bleu qui domine : le ciel nous paraît ainsi de cette couleur. ■ **Lise Loumé**

SDOMINIK/GETTY IMAGES

La plupart des personnes ayant vécu une expérience de mort imminente en Occident rapportent avoir vu un tunnel ou une lumière intense.

PSYCHOLOGIE

Que perçoit-on lors d'une expérience de mort imminente ?

Didier L.

Certaines personnes frôlant la mort entrent dans un état de conscience modifié : c'est l'expérience de mort imminente (EMI). Le contenu des EMI semble quasi identique. Les personnes qui l'ont vécue rapportent à 56 % des émotions positives, à 31 % la vue d'un tunnel, à 24 % la sensation de sortir de son corps, à 23 % une lumière intense ou encore à 32 % la rencontre avec des morts, d'après des données publiées dans *The Lancet* en 2001. Alors, sommes-nous tous prédisposés à avoir ces visions de lumière au bout du tunnel ? En réalité, bien que les EMI soient un phénomène universel, leur contenu pourrait être lié à nos attentes culturelles concernant la vie après la mort. En Occident par exemple, nous imaginons volontiers nos proches disparus présents quelque part, à nous attendre dans une autre dimension. Mais d'autres peuples, comme les Indiens et les Thaïlandais, vivent des EMI qui diffèrent de celles des Occidentaux sur plusieurs points, d'après une publication dans le *Journal of Near-Death Studies* de 2008. Par exemple, ils ne voient pas de tunnel. En revanche, 50 à 83 % d'entre eux disent avoir rencontré un homme avec un livre qui les renvoie vers les vivants en raison d'une erreur d'identité. C'est une référence à Yama, le dieu de la mort dans les religions hindouiste et bouddhiste. Plus ciblée encore, une étude menée en Allemagne en 2001 et publiée dans le *Journal of Near-Death Studies* a observé que les individus évoquant une EMI rapportaient significativement plus d'émotions négatives en ex-Allemagne de l'Est (60 %) qu'en ex-Allemagne de l'Ouest (29 %). ■ **Camille Gaubert**

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 920, octobre 2023

Les intrus

1 - SIX n'est pas un nombre en chiffres romains.

2 - IX n'est pas un nombre premier.

3 - 8D vaut 141 contre 140 pour les autres. 140 s'écrit 8C (8x16+12) en hexadécimal.

4 - BIC n'est pas un nombre hexadécimal (BAC vaut 2988 et BEC 3080).

5 - Ce sont de faux nombres romains. L'intrus est CLIM qui est du féminin.

6 - En hexadécimal, CAB (3243), l'intrus, est impair.
BEC vaut 3052 et FAC 4012.
Ils sont pairs.

Insomnie carrée

634 x 634 = 401956

Nombres croisés

	1	2	3	4	5	6
1	2	0	1	0	0	■
2	5	0	0	■	2	1
3	0	1	0	1	0	0
4	3	■	1	2	3	4
5	0	1	■	1	2	8
6	2	1	0	2	9	7

Une magie très séquentielle

14	12	9	22	10	→ 67
15	8	19	2	25	→ 69
5	20	23	11	1	→ 60
7	3	13	16	24	→ 63
21	18	6	17	4	→ 66
↓ 59	↓ 62	↓ 61	↓ 70	↓ 68	↓ 64 ↘ 65

Échec au lion

Entre les pattes d'un Lion / Un Rat sortit de terre assez à l'étourdie.
Le Roi des animaux, en cette occasion, / Montra ce qu'il était, et lui donna la vie.

Une formidable diversité

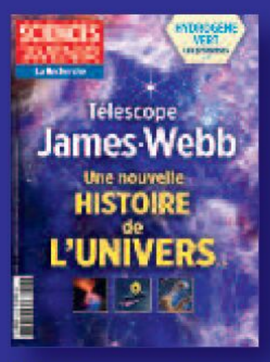
11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

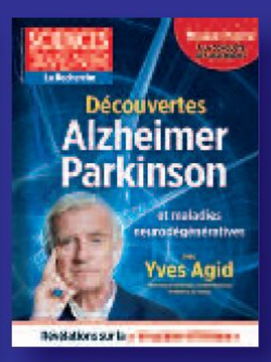
N° 914 Les clés du contrôle de soi

N° 915 Les solutions pour produire son énergie

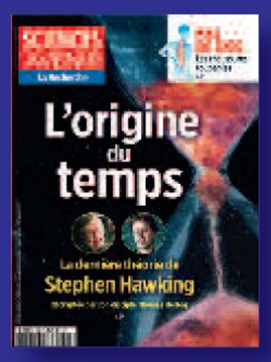


N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

N° 917/918 Spécial Eau



N° 919 Découvertes sur Alzheimer et Parkinson



N° 920 L'origine du temps

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 912 ❑ N° 913 ❑ N° 914 ❑ N° 915 .....
❑ N° 916 ❑ N° 917/918 ❑ N° 919 ❑ N° 920

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

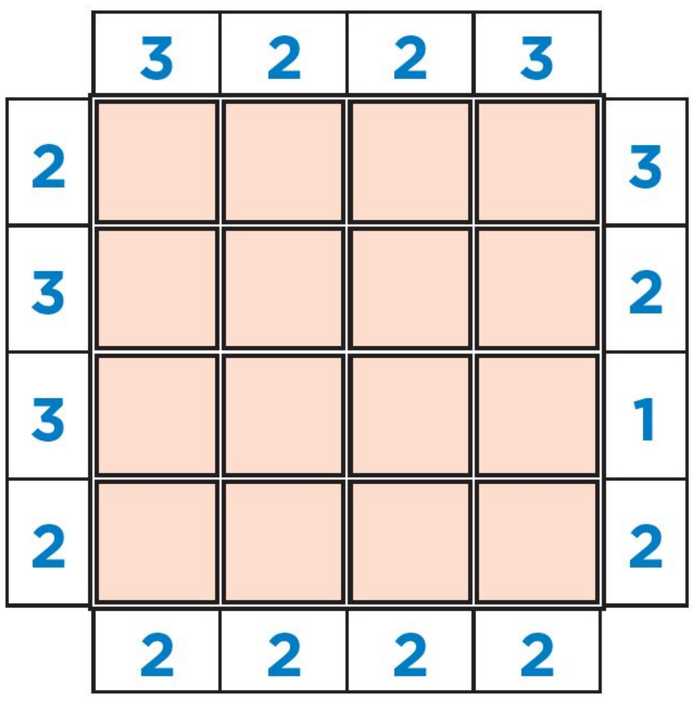
Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

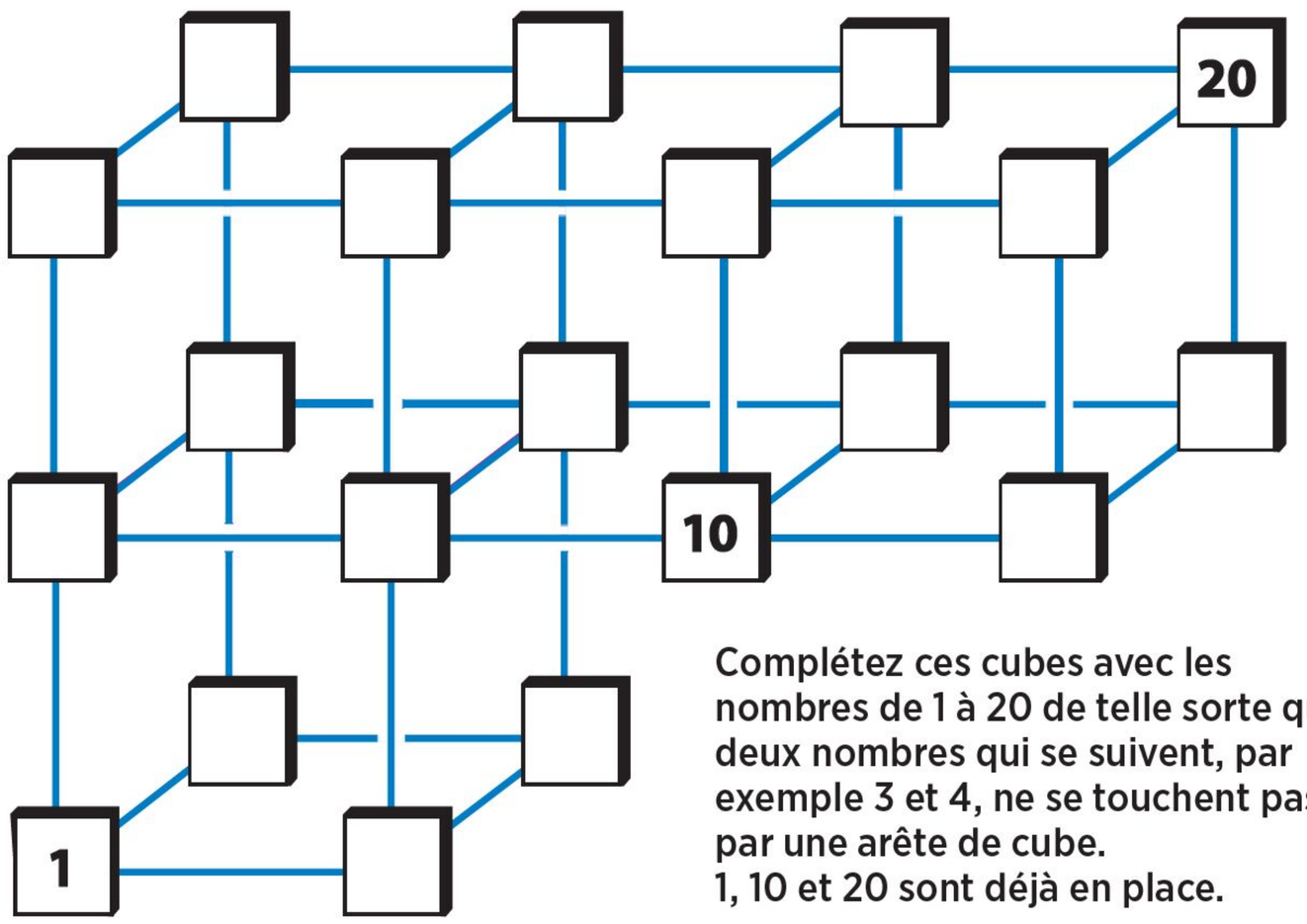
Gratte-ciel

Chaque case rose représente un immeuble de quelques dizaines d'étages (10, 20, 30, etc.). Ces immeubles sont de tailles différentes sur chaque alignement nord-sud et ouest-est. Chaque chiffre bleu indique le nombre d'immeubles visibles depuis ce chiffre pour un observateur à distance.

Saurez-vous indiquer leur hauteur, en partant de 10 pour le plus petit ?



Sudo-cube



Complétez ces cubes avec les nombres de 1 à 20 de telle sorte que deux nombres qui se suivent, par exemple 3 et 4, ne se touchent pas par une arête de cube.
1, 10 et 20 sont déjà en place.

Trouverez-vous au moins une solution ?

De l'ordre !

Avec les chiffres 12345678 écrits dans l'ordre, les 4 opérations et les parenthèses (mais sans le 9, donc) obtenez exactement 500.

Lire en comptant

Lionel et Nestor sont collectionneurs d'albums de BD. Lionel collectionne les albums « Tintin » et « Lucky Luke », son frère Nestor collectionne les albums « Babar ».

On sait que Lionel a plus d'albums que Nestor et que si Lionel avait deux fois plus de « Tintin », il lui en manquerait encore un pour avoir autant de « Tintin » que Nestor a de « Babar ».

Lionel a-t-il plus de « Lucky Luke » que de « Tintin » ? Si oui, combien ?

Lettres sur mer

Le prénom et le nom d'un grand navigateur sont cachés dans cette suite de prénoms :

ALAIN EMILE ELENA HENRI NAGUI

GAELE TOMMY SAVIN JULES AGNES

PAULA SUZIE LUCAS BRICE JORDI

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

CODE PRIVILÈGE : **CS447**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel**. Idéal avec le Safran !

7€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Vitalité - Tonus
GINSENG GELÉE ROYALE ET ACÉROLA BIO

Redynamisez-vous avec ces ampoules au **goût miel**. *(10).*

7€ 10 ampoules ~~18,40€~~

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**. *(6), (8).*

*Allergène : **poisson**.*

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(7).*

6€ 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile**. Idéal avec la Maca ! *(2), (4).*

6€ 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire**.

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

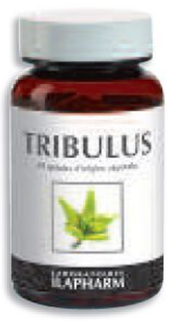
L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**.

6€ 10 ampoules ~~15,10€~~

(1), (2), (9).

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles**. *(2), (11).*



6€ 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

Les Écouteurs Bluetooth OU 1 tube d'Acérola BIO

1 cadeau au choix **OFFERT**

Écouteurs sans fil Bluetooth 5.0 : *autonomie de 6h ; puissance 1,5-2,0 W ; accessoire : câble USB noir.* ***Tube d'Acérola*** *de 15 comprimés à croquer.*

Les Frais de Port Dès 15€ d'achat **OFFERTS** **0€** *Au lieu de ~~6,50€~~*

dès **5€** **TOUS VOS PRODUITS**

EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
Les Écouteurs OU 1 Tube d'Acérola	OFFERT
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**28,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Déconseillé en cas de traitement antidiabétique. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Recommandé pour la livraison.* **de ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Ginseng Gelée Royale et Acérola BIO	TGG		7€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** ☐ Les Écouteurs ou ☐ 1 Tube d'Acérola et mon Catalogue				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
CODE PRIVILÈGE : **CS447**	**TOTAL À RÉGLER**			.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad — synadiet — La Poste 72h

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Recyclable

150 ANS*! IL N'Y A PAS D'ÂGE POUR PROMOUVOIR CET EMBALLAGE EN ALU ENTIÈREMENT RECYCLABLE, ET ON CONTINUERA.

CANETTES TRIEZ-LES !

*Heineken® est née en 1873.
Retrouvez nos engagements sur https://www.heineken.com/fr/fr/nos-engagements
Ces canettes sont tenues par un opérateur de centre de tri.

PUBLICIS CONSEIL RCS Nanterre 414 842 062

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ, À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.